DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE BALANÇO HÍDRICO PARA APOIO À GESTÃO PROATIVA DE SECAS EM RESERVATÓRIOS

Guilherme Bessa Araújo Nojosa [1] ; José Kerlly Soares de Araújo [2] & Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins [3]

Palavras-Chave – Simulador de balanço hídrico, Gestão proativa de secas, Apoio à decisão.

INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas são marcadas por alta variabilidade pluviométrica, recorrência de secas e forte dependência de reservatórios superficiais para garantir o abastecimento humano e os demais usos da água. No semiárido brasileiro, essa realidade torna a operação dos açudes um elemento central da segurança hídrica, especialmente em períodos prolongados de escassez, quando a manutenção do armazenamento passa a depender de decisões operacionais mais cuidadosas e antecipadas (Cirilo, 2008; ANA, 2017).

Historicamente, a gestão das secas no semiárido tem oscilado entre estratégias reativas e iniciativas voltadas à convivência com a escassez, mas ainda persistem desafios para transformar diretrizes de planejamento em instrumentos de apoio à decisão operacional. A literatura internacional sobre risco de seca reforça essa distinção: enquanto a gestão reativa concentra-se em responder a crises já instaladas, a gestão proativa antecipa medidas de mitigação a partir do monitoramento contínuo das condições hídricas, reduzindo a vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento (Vogt *et al*., 2018; Campos, 2014). Entretanto, essas estratégias dependem de ferramentas capazes de simular cenários de operação dos reservatórios, avaliar mudanças nas demandas e apoiar a tomada de decisão.

No Ceará, esse movimento se materializou nos Planos de Gestão Proativa de Seca (PGPS), iniciativa conjunta da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), da Secretaria dos Recursos Hídricos e do Programa Cientista Chefe de Recursos Hídricos, em parceria com a Universidade Federal do Ceará. Os PGPS estabelecem ações de mitigação associadas a diferentes estados de seca para hidrossistemas específicos. Entretanto, a avaliação quantitativa dos efeitos dessas ações sobre o comportamento futuro dos reservatórios ainda representa um desafio operacional, especialmente em sistemas sujeitos à elevada variabilidade hidrológica.

Entre as abordagens mais úteis para esse tipo de análise estão os modelos de balanço hídrico e os sistemas de alerta precoce de seca aplicados à operação de reservatórios, que permitem simular cenários de demanda, estimar a evolução do armazenamento e identificar momentos críticos de atendimento (Huang; Yuan, 2005). Estudos aplicados a reservatórios estratégicos do semiárido cearense têm avaliado, por exemplo, a capacidade de diferentes índices de seca hidrológica em capturar a frequência, a intensidade e a duração de eventos de escassez, contribuindo para o monitoramento operacional desses sistemas (Gonçalves *et al*., 2023).

Diante desse contexto, este trabalho apresenta um simulador computacional de balanço hídrico mensal voltado ao apoio da gestão proativa de reservatórios. A ferramenta automatiza o processamento de séries hidrológicas e gera indicadores de desempenho, como frequência de não

[1]) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: guibessa@alu.ufc.br
[2]) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: josekerlly@alu.ufc.br
3) FUNCEME. Avenida Rui Barbosa, 1246. Aldeota, Fortaleza, Ceará, Brasil. CEP: 60115-221. (85) 31011088. espr.martins@funceme.br

atendimento, déficit acumulado e evolução do armazenamento. Sua aplicação é demonstrada no Açude Acarape do Meio, com a série histórica de afluências de 1911 a 2017.

METODOLOGIA

O trabalho consistiu no desenvolvimento de um módulo prospectivo de simulação de balanço hídrico mensal, integrado a um sistema de apoio à decisão para a gestão proativa de secas (Nojosa *et al.*, 2026). O simulador processa séries hidrológicas, representa a operação mensal de reservatórios e gera indicadores de desempenho para subsidiar análises operacionais.

O simulador utiliza como dados de entrada a série histórica de afluências, a curva Cota-Área-Volume (CAV), as taxas mensais de evaporação, a capacidade máxima do reservatório, o volume inicial e a demanda hídrica considerada. A partir desses dados, aplica o balanço hídrico mensal para estimar a evolução do armazenamento e registrar ocorrências de déficit, falha no atendimento e vertimento, gerando informações de apoio à análise da segurança hídrica. A atualização mensal do volume armazenado é realizada por meio do balanço hídrico apresentado na Equação 1:

$$V_{t+1} = V_t + A_t - E_t - R_t - S_t \quad (1)$$

em que V_{t+1} representa o volume armazenado ao final do mês, V_t é o volume armazenado no início do mês, A_t corresponde à afluência mensal ao reservatório, E_t representa as perdas por evaporação, R_t é o volume efetivamente retirado para atendimento das demandas e S_t corresponde ao volume vertido. As retiradas são limitadas pela disponibilidade hídrica do reservatório; assim, quando o volume disponível não é suficiente para atender à demanda prevista, o simulador registra a ocorrência de falha e contabiliza o déficit correspondente. Quando o volume resultante do balanço excede a capacidade máxima de armazenamento, o excedente é registrado como vertimento, mantendo-se o volume final limitado à capacidade do reservatório.

As perdas por evaporação (E_t) são estimadas com base na área do espelho d'água, calculada a partir da relação entre volume armazenado e área superficial. Essa relação foi obtida por ajuste polinomial de terceiro grau da curva Cota-Área-Volume (CAV), permitindo estimar mensalmente a área correspondente ao volume do reservatório. A evaporação foi então calculada a partir dessa área e das taxas mensais adotadas, representando a variação das perdas evaporativas ao longo da simulação.

Ao final da simulação, o sistema gera automaticamente indicadores de desempenho, como Frequência de Não Atendimento (FNA), número de falhas, déficit acumulado, volume final, volume mínimo e vertimentos. A FNA é calculada pela razão entre o número de meses com falha e o total de meses simulados, expressa em porcentagem. A aplicação ao Açude Acarape do Meio é demonstrativa e busca evidenciar a capacidade do simulador de processar séries hidrológicas, aplicar o balanço hídrico e produzir informações de apoio à gestão proativa de secas.

RESULTADOS

O principal resultado deste trabalho foi o desenvolvimento de um simulador computacional de balanço hídrico mensal voltado à análise da operação de reservatórios em contextos de seca. A ferramenta foi estruturada para integrar, em uma única interface, os parâmetros de entrada da simulação, o processamento do balanço hídrico e a visualização dos principais indicadores de desempenho do reservatório.

A Figura 1 apresenta a interface principal do simulador, aplicada de forma demonstrativa ao Açude Acarape do Meio. A ferramenta permite ao usuário selecionar o reservatório, definir o volume inicial, estabelecer o período de simulação e informar a demanda considerada. A partir dessas informações, o sistema processa automaticamente os dados hidrológicos e operacionais, gerando indicadores como

frequência de falha, número de meses com demanda não atendida e evolução temporal do volume armazenado.

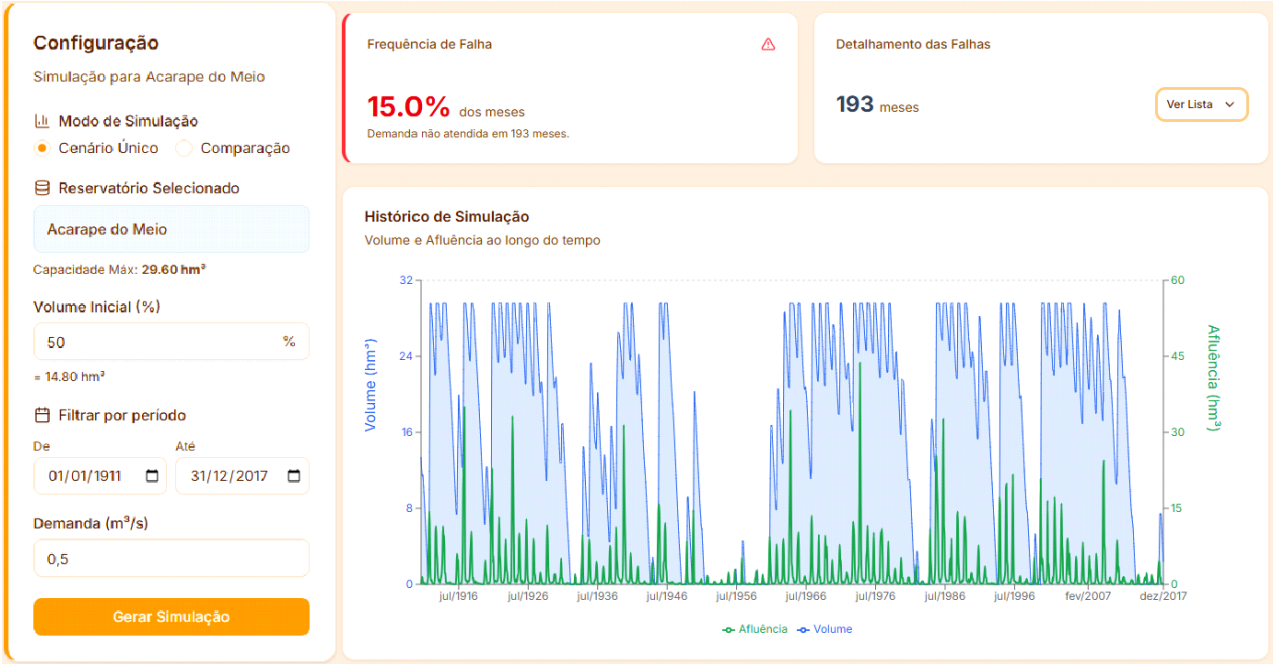


Figura 1 – Interface principal do simulador com parâmetros, indicadores e série temporal.

A interface permite visualizar, de forma integrada, o comportamento do reservatório ao longo do período simulado. O gráfico histórico apresenta simultaneamente a evolução do volume armazenado e das afluências mensais, facilitando a identificação de períodos críticos, eventos de recuperação do armazenamento e intervalos prolongados de escassez hídrica. Além disso, os indicadores sintéticos apresentados na interface permitem uma interpretação rápida do desempenho do sistema, contribuindo para o apoio à tomada de decisão.

Outro produto gerado pelo simulador é a saída tabular mensal, apresentada na Figura 2. Essa tabela detalha os principais componentes do balanço hídrico em cada mês da simulação, incluindo volume inicial, afluência, evaporação, retirada, vertimento e volume final. Essa organização permite verificar a rastreabilidade dos cálculos realizados pela ferramenta e analisar, de forma detalhada, como cada componente influencia a variação do armazenamento ao longo do tempo.

Dados Mensais
Página 3 de 107

Data	Vol. Inicial	Afluência	Evaporação	Retirada	Vertimento	Vol. Final
fev/1913	22.04	1.83	0.08	1.21	-	22.57
mar/1913	22.57	10.51	0.06	1.34	2.08	29.60
abr/1913	29.60	11.48	0.07	1.30	10.11	29.60
mai/1913	29.60	6.70	0.07	1.34	5.29	29.60
jun/1913	29.60	4.78	0.08	1.30	3.41	29.60
jul/1913	29.60	1.74	0.10	1.34	0.31	29.60

Figura 2 – Saída tabular do balanço hídrico mensal gerada pelo simulador.

A disponibilização dos resultados em formato gráfico e tabular amplia a utilidade operacional do simulador. Enquanto os gráficos favorecem a interpretação geral do comportamento do reservatório, a tabela mensal permite a análise detalhada dos cálculos e dos eventos registrados em cada etapa da simulação. Dessa forma, a ferramenta contribui para transformar séries hidrológicas e dados operacionais em informações objetivas para a gestão proativa de secas.

A aplicação demonstrativa ao Açude Acarape do Meio evidenciou a capacidade do simulador de operar com dados reais, processar longas séries históricas e gerar automaticamente indicadores relevantes para a avaliação do desempenho hídrico. Embora o estudo de caso tenha sido utilizado apenas para demonstrar a funcionalidade da ferramenta, os resultados indicam seu potencial para apoiar análises em outros reservatórios, desde que sejam inseridas as informações necessárias de entrada, como curva Cota-Área-Volume, afluências, evaporação e demandas.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um simulador computacional de balanço hídrico mensal para apoio à gestão proativa de secas em reservatórios. A ferramenta permite integrar dados hidrológicos, físicos e operacionais, automatizando a simulação da evolução do armazenamento e a geração de indicadores como falhas, déficits, vertimentos e frequência de não atendimento.

A aplicação demonstrativa ao Açude Acarape do Meio evidenciou a capacidade do simulador de processar dados reais e representar a dinâmica mensal de armazenamento em reservatórios do semiárido. Assim, o simulador apresenta potencial para apoiar a tomada de decisão e a operacionalização dos Planos de Gestão Proativa de Seca, podendo ser adaptado a outros reservatórios mediante a inserção dos dados necessários.

REFERÊNCIAS

ANA (2017). Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação — Relatório Síntese. Brasília, 2017.

CAMPOS, J. N. B. (2014). “Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos”. Estudos Avançados, v. 28, n. 82, p. 65-88.

CIRILO, J. A. (2008). “Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido”. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 61-82.

GONÇALVES, S. T. N. et al. (2023). “Comparative analysis of drought indices in hydrological monitoring in Ceará’s semi-arid basins, Brazil”. Water, v. 15, n. 7, p. 1259.

HUANG, W. C.; YUAN, L. C. (2005). “Drought early warning system in reservoir operation: theory and practice”. Water Resources Research, v. 41.

NOJOSA, G. B. A.; CID, D. A. C.; SILVA, S. M. O. (2026). "Operacionalizando a Gestão Proativa de Secas: Desenvolvimento e Validação de um Sistema de Apoio à Decisão no Semiárido Cearense" in Anais do XVIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Aracaju, Nov. 2026.

VOGT, J. V. et al. (2018). Drought Risk Assessment and Management: A Conceptual Framework. Publications Office of the European Union, Luxemburgo, 2018.