

APLICAÇÃO DE INDICADORES DE PERFORMANCE NA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS: UM ESTUDO DE CASO

Michel Portela Paixão¹; Ticiana Marinho de Carvalho Studart²; José Nilson Beserra Campos² e Ricardo Marinho de Carvalho³

Resumo. O presente trabalho apresenta uma metodologia para estudar as secas hidrológicas através de quatro Indicadores de Performance (IP): *confiabilidade*, *resiliência*, *vulnerabilidade* e *magnitude*. Estes critérios são utilizados para ajudar na avaliação e seleção de projetos de recursos hídricos. Neste trabalho, foi utilizado como exemplo a Bacia do Curu, localizada no Estado do Ceará, onde foram selecionados os reservatórios com capacidade superior a 100 hm³. As secas hidrológicas, neste caso, foram estudadas, cronologicamente, em quatro épocas distintas a fim de se analisar as consequências da construção de cada barragem. Através desta pesquisa, pode-se concluir que a performance do sistema melhorou ao longo dos anos e isto pode ser traduzido por todos os critérios utilizados.

Abstract. This paper presents a methodology to study hydrological droughts through four Performance Indices (PI): *reliability*, *resilience*, *vulnerability* and *magnitude*. These criteria are used to help in the evaluation and election of water resources projects. In this research, Curu River Basin, located in the State of the Ceará, was used as study case, within had been selected the reservoirs with storage capacity larger than 100hm³. The hydrological droughts had been studied at four distinct times, in order to analyze the consequences of the construction of each reservoir. It can be concluded that the system's performance had improved as time passed by and this was perceived in the criteria used.

Palavras-chave: secas hidrológicas, confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade, magnitude.

¹ Engenheiro Civil da Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE. Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Av. Dr. Lauro Vieira Chaves, 1030, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60.420-280, Fone (85)433.5747. E-mail:michelportela@bol.com.br

² Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 713, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60.451-970, Fone: (85) 288.9623, Fax: (85)288.9627 e-mails: ticiana@ufc.br e nilson@ufc.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Edificações – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 710, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: ricardomarinho@fortalnet.com.br

INTRODUÇÃO

Dentre os desastres naturais, a seca é, com certeza, o fenômeno mais complexo de se analisar. Furacões, terremotos e enchentes possuem inícios e termos bem definidos e suas consequências são muito evidentes para a população. As secas, por sua vez, iniciam-se lentamente e possuem durações relativamente longas, cobrindo grandes áreas e ocasionando uma série de danos à população atingida.

A complexidade do fenômeno, com suas diferentes causas e efeitos, pode ser a razão pela qual, há na literatura tantas definições diferentes para *seca*. Do ponto de vista *meteorológico*, a seca está presente quando a quantidade de precipitação ocorre abaixo de um estipulado nível crítico, geralmente o valor médio, durante um certo período. Sob o ponto de vista *ambiental*, a seca está relacionada com as mudanças dos processos naturais ocasionados pelos longos períodos de déficits hídricos. Sob o ponto de vista *sócio-econômico*, a definição de seca não deveria considerar apenas o fornecimento de água, mas também a demanda de água em uma maneira explícita. Isto significa que uma seca depende do tipo de *uso da água* bem como na densidade e distribuição dos usuários (Correia, 1991). Do ponto de vista *hidrológico*, a seca pode ser entendida como a insuficiência de águas nos rios ou reservatórios para atendimento das demandas de águas já estabelecidas em uma dada região. Essa seca pode ser causada por uma sequência de anos com deficiência no escoamento superficial ou, também, por um mau gerenciamento dos recursos hídricos acumulados nos açudes. O resultado desse tipo de seca é o racionamento, ou colapso, em sistemas de abastecimento d'água das cidades ou das áreas de irrigação (Sólon, Campos e Studart, 2001).

O conceito de seca tem também diferentes conotações em várias partes do mundo. Em Bali, um período qualquer de seis dias (ou mais) sem chuva é considerado como seca; na Líbia, a seca só é reconhecida após dois anos sem chuvas; no Egito, é seca se não há enchente no rio Nilo, mesmo que haja precipitações (Hudson e Hazen, 1964).

No Nordeste Brasileiro, a principal solução encontrada para o combate às secas sempre se deu através da açudagem, visando ao armazenamento da água e seu uso posterior na época de escassez. Mas, apesar dos esforços para o aumento da oferta hídrica na região Nordeste, muitas vezes o investimento não obtém os resultados esperados. Este problema poderia ser minimizado se, nos estudos de concepção dos reservatórios, houvesse uma avaliação da performance do sistema em relação às secas através de critérios selecionados e bem definidos.

Uma das maneiras de se avaliar a performance de um sistema hídrico é através do tempo, onde as simulações são feitas desde o sistema no seu estado *natural*, ou seja, sem a intervenção humana, até o momento em que todas as estruturas hídricas – as quais teoricamente vêm a colaborar

com a melhoria da eficiência do sistema – venham a ser incorporadas. Através desta metodologia, o tomador de decisão pode ter mais uma ferramenta para analisar a inclusão de um açude neste meio e determinar, assim, a sua viabilidade, ou não, de sua construção.

Hashimoto et. al. (1982) introduziu três critérios de performance chamados de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. São critérios que podem medir a performance de um sistema, especialmente em períodos críticos como os eventos de seca, além de dar melhores condições para o analista prever cenários futuros. Similarmente, Ganoulis (1994) define como Índices de Desempenho (ou Performance – PI) medidas que indicam o comportamento do sistema quando condições externas criam efeitos adversos. Durante alguns períodos, incidentes podem ocorrer e acarretar o não cumprimento das funções para as quais o sistema se propôs, configurando assim uma situação de falha do sistema.

A definição destes critérios está fundamentada na hipótese de que o sistema de recursos hídricos em questão pode ser descrito por um processo estocástico estacionário, ou seja, a distribuição de probabilidades que descreve a série temporal não muda com o tempo.

ESTUDO DE CASO

Para aplicação da metodologia, foi escolhida a Bacia do Curu localizada no Estado do Ceará. As razões da escolha da Bacia do Curu se devem à sua grande importância econômica para a região, através do aproveitamento agrícola advindo dos perímetros de irrigação, além de ter sido a primeira bacia do Ceará a ter implementado o novo modelo de gestão das águas. No Comitê da Bacia do Curu, os principais atores (usuários, governo e operação) se reúnem para discutir e tomar decisões sobre as regras de operação sistema.

Nesta bacia, existem três reservatórios com capacidade acima de 100 hm³: o açude General Sampaio (barra o rio Curu e possui um volume máximo de acumulação de 322 hm³), o açude Pentecostes (barra o rio Canindé, afluente do rio Curu, e possui um volume máximo de acumulação de 396 hm³) e o açude Caxitoré (barra o rio Caxitoré, afluente do rio Curu, e possui um volume máximo de acumulação de 202 hm³).

Através da aplicação dos quatro indicadores de performance citados, pode-se analisar a evolução temporal das secas hidrológicas na bacia da Curu, desde as condições naturais (antes dos barramentos terem sido construídos) até os dias atuais. A seção do rio a ser analisada é um ponto hipotético próximo à foz do rio Curu.

O primeiro passo é determinar o tipo de seca a ser estudada. A escolhida foi a seca hidrológica, caracterizada nesta pesquisa pela falta de oferta hídrica, ou seja, as vazões que ocorrem na bacia não atendem à demanda exigida pelo sistema - os distritos de irrigação e os sistemas de

abastecimento de água. Para efeito de estudo, a unidade temporal é o mês. Assim, só é considerada a existência de uma seca quando o déficit hídrico ocorre em um período maior que um mês.

CENÁRIOS ANALISADOS

A fim de estudar cronologicamente o comportamento da bacia, foram caracterizados quatro períodos distintos, denominados aqui como Cenários.

- **Cenário Zero** - antecede a construção do açude General Sampaio, primeiro açude a ser construído (1935); possui como característica as vazões correspondentes ao rio Curu, ao rio Canindé e ao rio Caxitoré.
- **Cenário 1** - corresponde ao período de 1935 (final da construção do açude General Sampaio) a 1957 (antes da construção do açude Pentecoste). Tem como característica a vazão regularizada pelo açude General Sampaio, os possíveis extravasamentos e as vazões naturais do rio Canindé e Caxitoré.
- **Cenário 2** - inicia em 1957 (após a construção do açude Pentecoste) e finaliza em 1962 (antes da construção do açude Caxitoré). Possui como característica as vazões regularizadas e os possíveis extravasamentos dos açudes General Sampaio e Pentecostes e a vazão natural do rio Caxitoré.
- **Cenário 3** - corresponde ao período de 1962 (após a construção do açude Caxitoré) até os dias atuais, onde a bacia está com todos os trechos estudados com vazões regularizadas além de possíveis extravasamentos.

METODOLOGIA

Para a determinação das vazões regularizadas, fez-se uso do programa SIMRES, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, que simula o comportamento de um reservatório pelo Método de Monte Carlo. Foram gerados 5.000 traços de vazão anual seguindo uma distribuição Gama II. Essas vazões foram desagregadas em valores mensais através do Método dos Fragmentos (Svanidze, 1980); segundo (Araújo, 1991), este método produz bons resultados para os rios intermitentes do Semi-Árido Brasileiro.

Aplicação da Teoria dos Runs

Após simulação dos reservatórios, dar-se-á início ao estudo das secas hidrológicas através da Teoria dos Runs. Em termos clássicos, um run é definido como *uma sequência de observações do mesmo tipo precedido e sucedido por uma ou mais observações de um diferente tipo*. Os runs da

seqüência contínua de uma variável estocástica ou uma combinação dos componentes estocásticos e determinísticos, tornando-a uma seqüência composta, pode ser definida em várias maneiras (Yevjevich, 1976).

A Figura 1 representa uma série contínua de uma variável x_t . Seleccionando um valor arbitrário X_0 , denominado *nível de truncamento*, a série é interceptada em vários pontos e a relação do valor constante X_0 para todos os outros valores de x_t serve como base para várias definições de runs. Entretanto, X_0 não necessita ser uma constante e pode ser concebido como um parâmetro, uma função determinística, uma variável estocástica ou uma combinação destes. Usualmente, X_0 é assumido como uma constante arbitrária, a qual deve ser selecionada antes dos runs serem investigados, se não for afirmado o contrário. Para efeito de análise deste estudo, o nível de truncamento é a vazão de demanda a ser atendida.

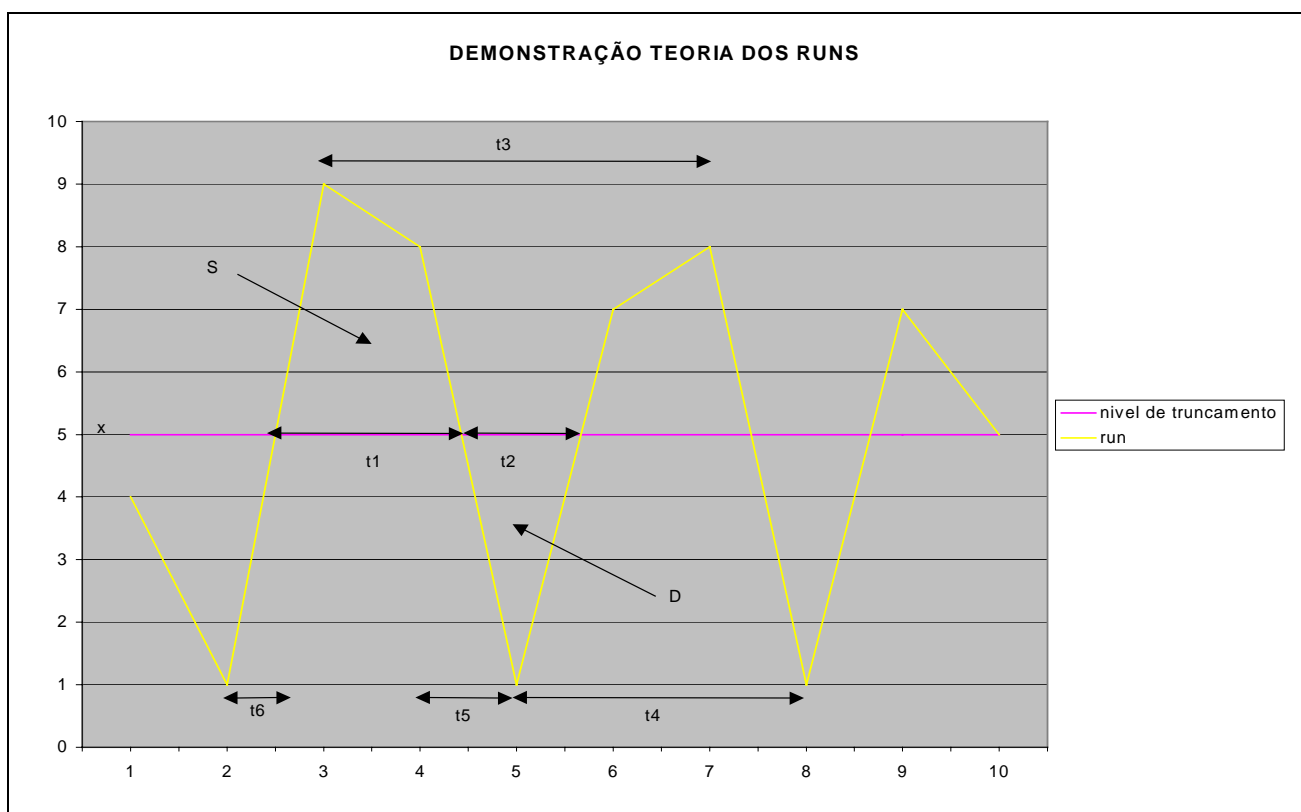


Figura 1. Ilustração da Teoria dos Runs

Várias definições de runs são usadas na literatura. Algumas delas são as seguintes:

- τ_1 – distância entre cruzamentos superiores,
- τ_2 – distância entre cruzamentos inferiores,
- τ_3 – distância entre picos sucessivos,
- τ_4 – distância entre depressões sucessivas,

τ_5 – distância entre consecutivos cruzamentos superiores e cruzamentos inferiores,

τ_6 – distância entre cruzamentos inferiores e cruzamentos superiores.

Na Figura 1, S é a integral dos desvios positivos entre consecutivos cruzamentos superiores e cruzamentos inferiores (também chamado de excedente) e D a integral dos desvios negativos entre consecutivos cruzamentos superiores e cruzamentos inferiores (também chamado de déficit). Após definir o run, é necessário nomeá-los. Todos os runs relacionados a desvios positivos, $(x_t - x_0) > 0$, são chamados de runs positivos; aqueles relacionados a desvios negativos, $(x_t - x_0) < 0$ são chamados runs negativos. Através de todas estas definições de runs, elas podem ser aplicadas para vários problemas na hidrologia e nos recursos hídricos.

Índices de performance

Neste trabalho, o evento *seca* ocorre quando há a constatação de um *run negativo*, ou seja, quando um run é menor do que o nível de truncamento. Através do gráfico gerado pela Teoria do Runs, pode-se compor quatro critérios para a análise das secas hidrológicas geradas.

Confiabilidade

A operação do reservatório se encontra estável quando a oferta hídrica é maior ou igual à demanda do sistema. Quando a oferta cai para níveis menores do que a demanda, é dito que o sistema entrou em colapso ou falha. Assim, confiabilidade é a probabilidade da operação do sistema estar em estado satisfatório. Dado uma vazão de demanda Qd como nível de truncamento e a vazão disponível Qr como a série sintética de oferta hídrica gerada, tem-se em termos matemáticos:

$$\begin{cases} Qd \leq Qr, & \text{sistema satisfatório}(s) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Qd > Qr, & \text{sistema falho} \quad (f) \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

Qd = vazão de demanda

Qr = vazão regularizada

Logo, a probabilidade de um sistema se encontrar em um estado satisfatório será dado por:

$$P(s) = \frac{\sum_{to}^{tf} s_n(t)}{\sum_{to}^{tf} s_n(t) + \sum_{to}^{tf} f_n(t)} \quad (3)$$

Onde:

n = número de vezes que o sistema se encontra satisfatório

to = tempo inicial da operação do sistema

t = tempo final da operação do sistema

Por conseguinte, a probabilidade de um sistema se encontrar em um estado insatisfatório será dada por:

$$P(s) = \frac{\sum_{to}^{tf} f_n(t)}{\sum_{to}^{tf} s_n(t) + \sum_{to}^{tf} f_n(t)} \quad (4)$$

Resiliência

Dado que o sistema hídrico se encontra em falha (seca), é interessante para o analista saber por quanto tempo o sistema se comportará dessa maneira. Assim, a resiliência é a medida em escala de tempo da capacidade do sistema em retornar ao estado satisfatório, uma vez que a falha ocorre. Um sistema muito resiliente consegue voltar o mais cedo possível ao estado normal de operação, enquanto que um sistema pouco resiliente se caracteriza por um evento prolongado e de recuperação lenta. Logo:

$$R = t_f - t_i, \quad (5)$$

onde

t_i = instante de tempo tal que $Q_d \geq Q_r(t_i)$ e $Q_d > Q_r(t_{i+1})$;

t_f = instante após t_i tal que $Q_r(t_f) \geq Q_d$ e $Q_r(t_{f+1}) > Q_d$

Vulnerabilidade

O sistema se encontra em estado insatisfatório por um determinado período de tempo. No entanto, este quadro não demonstra quais as conseqüências que a falha pode estar ocasionando. Portanto, para este estudo, a vulnerabilidade é a quantidade hídrica em termos de *volume* que o sistema deixa de ofertar para suprir as necessidades contidas no mesmo, uma vez que há a ocorrência de seca.

Assim, quanto maior o déficit hídrico, mais vulnerável é o sistema. Um sistema pode ser muito resiliente, mas bastante vulnerável, enquanto que outro sistema pode ser pouco resiliente, no entanto, pouco vulnerável. Através do gráfico gerado pela Teoria dos Runs, a vulnerabilidade para uma dada seca pode ser expressa da seguinte forma:

$$V = \int_{t_i}^{t_f} f(t) dt, \text{ onde } f(t) = (Q_d - Q_r(t)) \quad (6)$$

Magnitude

A magnitude é o déficit hídrico médio que ocorre na época da seca. Este critério dá uma idéia de quanto demanda precisa ser reduzida para se poder atender o sistema. A magnitude pode ser escrita pela Equação 7:

$$M = \frac{I}{R} \int_{t_i}^{t_f} (Qd - Qr(t)) dt \quad (7)$$

Muitas vezes pode acontecer de o sistema ser tão vulnerável e pouco resiliente que a magnitude será grande o suficiente para a estagnação total do sistema. Isto pode acontecer quando a oferta hídrica é aproxima ou iguala à vazão nula.

Níveis de Truncamento

Em termos de níveis de demanda, foram utilizados seis níveis de demanda, a saber: 20, 50 e 70 % da total das vazões regularizadas pelos reservatórios ao longo de uma simulação de 5.000 anos. Estes valores foram escolhidos em virtude da COGERH (Companhia de Gestão em Recursos Hídricos) estar trabalhando com estas faixas de vazões nos últimos anos na bacia escolhida para a pesquisa, tanto na estação seca, tanto na estação chuvosa.

RESULTADOS

Foi gerado para cada um dos três reservatórios uma série estocástica de 5.000 anos de vazões anuais utilizando a distribuição Gamma II, com os seguintes parâmetros:

Tabela 1: dados estatísticos dos reservatórios estudados

Reservatório	μ (hm ³ /ano)	σ	Semente
General Sampaio	117,4	183,0	5063824
Pentecostes	451,66	525,61	26537148
Caxitoré	126,31	151,43	12345678

Onde:

μ = média das vazões anuais afluentes ao reservatório e σ = desvio padrão das vazões anuais afluentes.

Após a geração das séries sintéticas anuais, foi necessário desagregá-las em séries sintéticas mensais, pois a unidade de tempo utilizada é o *mês*.

Simulação dos reservatórios

De posse das séries estocásticas das vazões afluentes mensais, foi executada a simulação dos três reservatórios em um período de 60.000 meses (5.000 anos). Para tal, foi utilizada a equação do balanço hídrico. Com a simulação, pode-se encontrar para cada reservatório uma vazão regularizada

com uma garantia de 90%, bem como toda a série com os meses que tiveram extravasamento e os meses que tiveram falhas, ou seja, o mês que o reservatório não teve condições de suprir a vazão regularizada supracitada. A Tabela 2 resume as vazões regularizadas encontradas para cada reservatório.

Assim, a vazão regularizada para um cenário de estudo de 5.000 anos na bacia do Curu, considerando que existem apenas estes três reservatórios foi de 20,33 hm³/mês. De posse da vazão regularizada, pode-se definir os níveis de truncamento correspondentes a 20, 50 e 70% da mesma. Portanto, os níveis de truncamento foram de 4,06 hm³/mês, 10,16 hm³/mês e 14,23 hm³/mês.

Tabela 2: Vazão regularizada de cada reservatório

RESERVATÓRIO	Q _{regularizada} (hm ³ /mês)
General Sampaio	4,59
Pentecostes	11,46
Caxitoré	4,28
TOTAL SISTEMA	20,33

Indicador de Performance I – Confiabilidade

Para cada Cenário e nível de truncamento, foi calculado o número de meses falhos, ou seja, o número de meses em que a vazão disponível ficou abaixo de um certo nível de truncamento. Pela Figura 2, pode-se perceber que há um grande decréscimo do número de meses falhos entre o *Cenário Zero* e o *Cenário 3*. No *Cenário Zero*, onde a bacia se encontra no estado natural, o sistema se encontra pouco confiável para todos os níveis de truncamento, com uma probabilidade de falha acima de 50%.

No *Cenário 1*, para o nível de corte de 4,06 hm³/mês, a confiabilidade passa para 97%, ou seja, a probabilidade de haver uma falha é de apenas 3%. Este resultado se deve ao açude General Sampaio que pode regularizar até 4,59 hm³/mês, porém para os outros níveis de corte o açude colaborou em níveis insignificantes para a melhora da confiabilidade.

A melhora da confiabilidade para todos os níveis de truncamento se deve à alta capacidade de regularização do açude Pentecostes, correspondente ao *Cenário 2*, o qual pode ofertar até 11,46 hm³/mês. Para os níveis de truncamento estudados, a confiabilidade melhorou cerca de 40%, passando para níveis acima de 94%. Para o nível de truncamento 4,06 hm³/mês, a confiabilidade atinge a casa de 99,90%. No *Cenário 3*, o açude Caxitoré pouco influenciou para aumentar a confiabilidade do sistema, pois a melhora foi um pouco acima de 2%, no entanto o suficiente para que a confiabilidade passasse, para todos os níveis de truncamento, acima de 97%, incluindo para o

nível de truncamento de $4,06 \text{ hm}^3/\text{mês}$ que houve apenas 4 meses falhos dentro de um universo de 60.000 meses estudados.

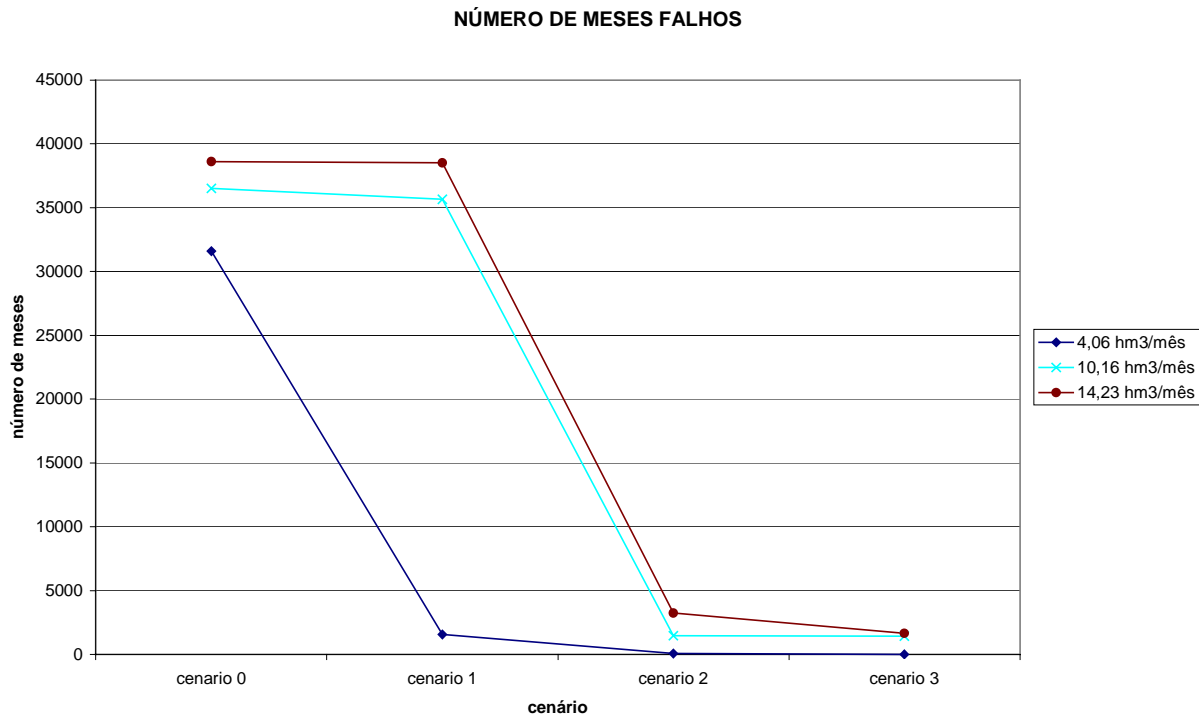


Figura 2- Número de meses falhos do Cenário Zero ao Cenário 3

Indicador de Performance II – Resiliência

Com relação a resiliência média, a Figura 3 demonstra que, com a construção dos açudes, o sistema melhorou seu desempenho. No *Cenário Zero*, dependendo do nível de truncamento adotado, a resiliência média oscilou entre cinco e sete meses. Com a inclusão do açude General Sampaio (*Cenário um*), a resiliência só foi melhorada para o nível de truncamento de $4,06 \text{ hm}^3/\text{mês}$, que passou de 5,78 para 4,39. O fator colaborador foi que com a construção deste reservatório houve uma diminuição das falhas nos meses de Janeiro e Fevereiro, o que caracterizou as secas com períodos compreendidos entre Setembro a Dezembro. Com relação aos outros níveis de truncamento, a resiliência continuou constante.

A melhora da resiliência para os níveis de truncamento $10,16 \text{ hm}^3/\text{mês}$ e $14,23 \text{ hm}^3/\text{mês}$ só vieram a acontecer no *Cenário 2*. Para o nível de truncamento de $10,16 \text{ hm}^3/\text{mês}$, a resiliência passou de 6,34 para 4,72 meses devido a melhora do nível de confiabilidade do mês de Fevereiro. Assim, as secas para possuem um período característico compreendido entre Setembro e Janeiro. No *Cenário 3*, para os três níveis de truncamento estudados, praticamente não houve uma melhoria da resiliência no sistema. Vale salientar que o aumento da resiliência média para o nível de truncamento de $4,06 \text{ hm}^3/\text{mês}$, passando de 3,1 para 4 meses, se deve ao fato que o número de secas

apresentadas no *Cenário 2* foram de 19 eventos de secas, enquanto que no *Cenário 3* houve apenas um evento de seca com uma resiliência de quatro meses num período de simulação de 60.000 meses. Em vista disto, este evento poderia ser descartado para efeitos de resultados.

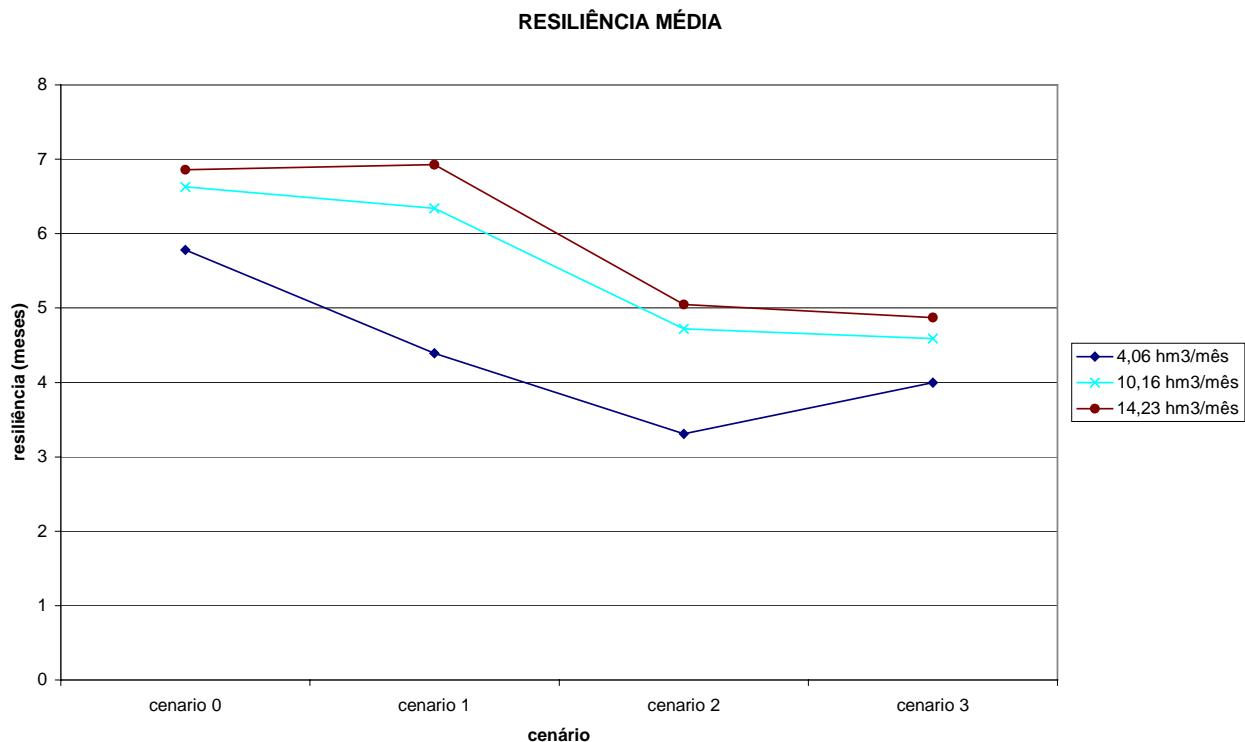


Figura 3: Resiliência média ao longo dos Cenários 0 a 3

Indicador de Performance III – Vulnerabilidade

Pela Figura 4, pode-se perceber que o sistema ficou menos vulnerável com a construção dos três reservatórios. No *Cenário Zero*, a vulnerabilidade média variou entre 21,31 a 85,08 hm^3 . No *Cenário 1*, para todos os níveis estudados, houve uma melhora da vulnerabilidade média, no qual o nível de truncamento de 10,16 $\text{hm}^3/\text{mês}$ apresentou o maior decréscimo, passando de 59,15 hm^3 para um déficit hídrico mensal de 33,22 hm^3 . No *Cenário 2*, a construção do açude Pentecostes favorece a diminuição da vulnerabilidade média principalmente para o maior nível de truncamento estudado (14,23 $\text{hm}^3/\text{mês}$), o qual passou de 60,87 hm^3 para um déficit hídrico de 28,06 hm^3 .

No *Cenário 3*, o nível de truncamento de 4,06 $\text{hm}^3/\text{mês}$ teve apenas um evento de seca com uma vulnerabilidade de 9,12 hm^3 , similar à vulnerabilidade média encontrada no cenário predecessor. O maior decréscimo da vulnerabilidade encontrada neste cenário advém do nível de truncamento 10,16 hm^3 , o qual passou de 24,5 hm^3 para 7,53 hm^3 . A característica das secas ocorridas no *Cenário 3* são advindas da vazão regularizada nula do açude Pentecostes, ou seja, há a ocorrência de seca para este nível quando o açude Pentecostes não consegue suprir o sistema com água necessária. No entanto, o sistema está sendo abastecido normalmente pelos açudes Caxitoré e

General Sampaio, o que resulta em uma oferta hídrica de 8,87 hm³/mês, valor este muito próximo da demanda (10,16 hm³/mês), ocasionando uma vulnerabilidade muito pequena. Já a vulnerabilidade média para o nível de truncamento de 14,23 hm³/mês continuou praticamente constante entre o *Cenário 2* e o *Cenário 3*.

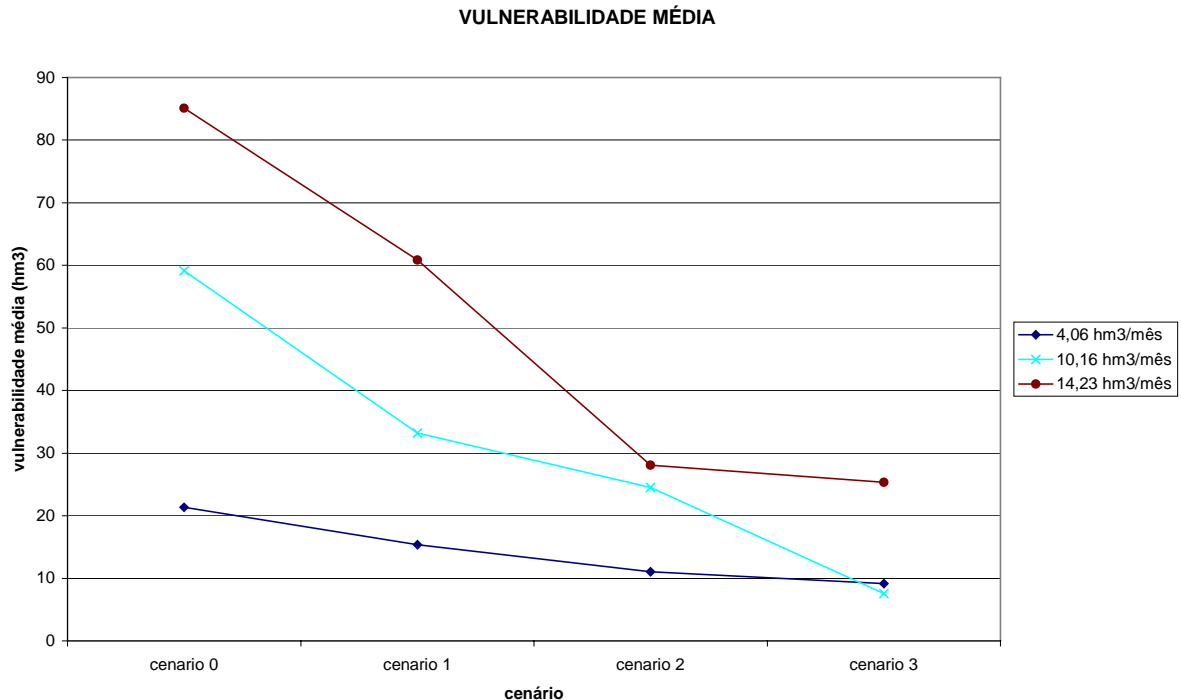


Figura 4: Vulnerabilidade média do sistema ao longo dos Cenários 0 a 3

Indicador de Performance IV – Magnitude

A magnitude média foi o índice de performance que apresentou características diferentes para os níveis de truncamento pesquisados. O nível de truncamento de 4,06 hm³/mês teve um decréscimo muito pequeno entre os *Cenários Zero e 3*. O nível de truncamento 10,16 hm³/mês teve um decréscimo da vulnerabilidade média com a operação do açude General Sampaio, não sofreu influência do açude Pentecostes e veio a melhorar de novo com o açude Caxitoré. O nível de truncamento de 14,23 hm³/mês possuía um déficit hídrico mensal de 11,96 hm³/mês no *Cenário Zero*, foi diminuindo até o *Cenário 2* onde obteve uma vulnerabilidade média de 5,2 hm³/mês e continuou com este valor mesmo com a contribuição da vazão regularizada do açude Caxitoré (Figura 5).

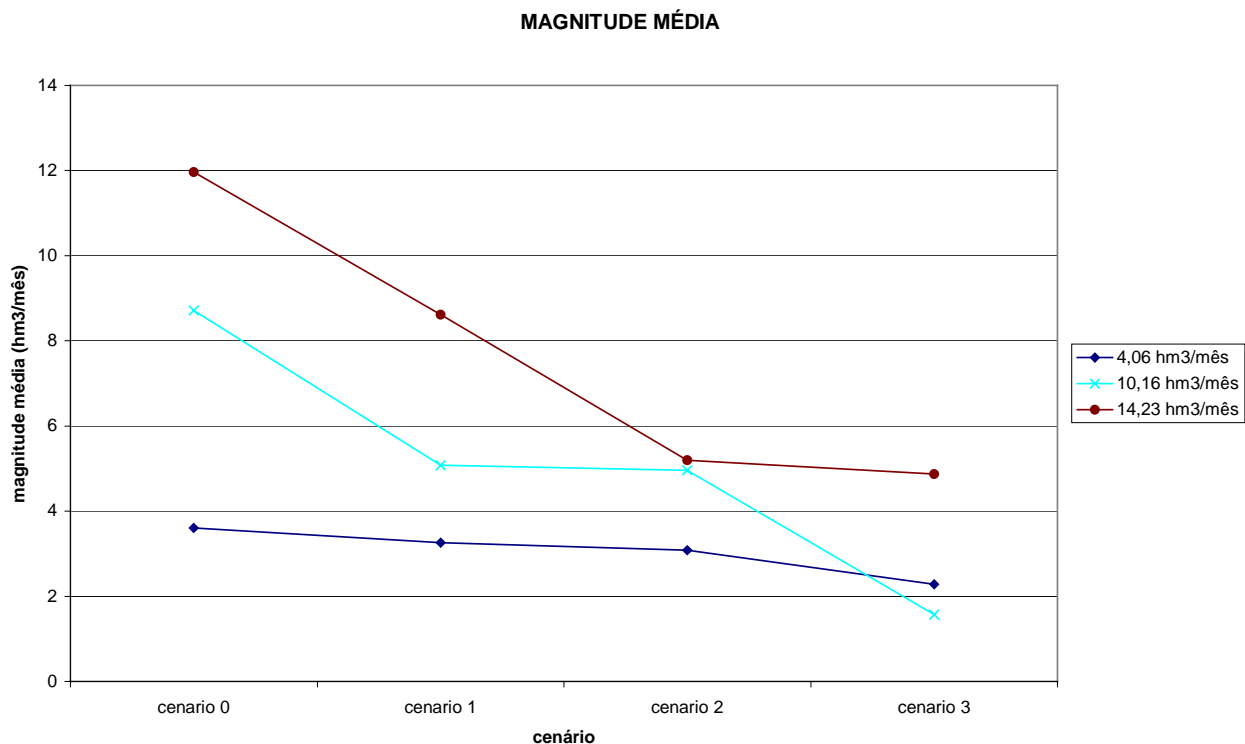


Figura 5: Magnitude média ao longo dos quatro cenários

CONCLUSÕES

Apesar da complexidade fenômeno *seca*, é importante encarar este evento natural adequadamente, pois não se trata apenas de uma deficiência de precipitação, mas um fenômeno muito mais complexo e que influencia a sociedade como um todo. Por isso, é essencial para o tomador de decisão, o uso de ferramentas que possibilitem antecipar ou visualizar erros na fase de planejamento que possam ocasionar eventos desastrosos posteriormente.

A metodologia apresentada neste artigo teve a intenção de colaborar no sentido de caracterizar as secas tanto em termos quantitativos como qualitativos. Para tal, foram utilizados quatro critérios, denominados Índices de Performance (IP): *confiabilidade*, *resiliência*, *vulnerabilidade* e *magnitude*. Como estudo de caso, foi utilizada a bacia hidrográfica do Curu, no Estado do Ceará, através de seus três principais açudes.

Para uma demanda de 10,16 hm³/mês, por exemplo, observou-se que a construção de cada reservatório colaborou de maneira diferente para a melhoria da performance da bacia. Para o sistema ficar mais confiável, a construção do açude Pentecoste foi de suma importância, tendo em vista o valor elevado da vazão regularizada, relativamente aos outros reservatórios analisados. Para diminuir a duração das secas, a participação do açude Pentecoste foi o mais importante, mas a participação conjunta dos três reservatórios foi o fator preponderante para a obtenção do sucesso. Visando diminuir o déficit hídrico ao longo de uma estação seca, mais uma vez a construção dos

três reservatórios foi importante, porém os açudes General Sampaio e Caxitoré foram os atores mais influentes para este decréscimo, fato este similar ao ocorrido no indicador de performance *magnitude*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J.K. (1991) -. Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios. Fortaleza, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (Dissertação de Mestrado).

CORREIA, F.N., SANTOS, M. A., RODRIGUES, R.R. (1991)- Reliability in Regional Drought Studies. NATO ASI Series, Vol G29 Water Res. Eng. Assest.

DRACUP, J.A., LEE, K.S., PAULSON, E.N.Jr. (1980). - On the Definition of Droughts. Water Resour. Res. 16(2), 297 – 302..

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.; LOUCKS, D.P. (1982) – Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. Water Resour. Res. 18(1), 14 – 26.

HUDSON, H. E., HAZEN, R. (1964) – Droughts and Streamflow, in Handbook of Applied Hydrologym Sect. 18, edited by V. T. Chow, McGraw-Hill, New York, 1964.

GANOULIS, J.G. (1994). Engineering Risk Analysis of Water Pollution. VCH Publishers Inc., New York, NY.

SHIN, H., SALAS, J.D. (2000) – Regional Drought Based on Neural Networks. Journal of Hydrologic Engineering. 5(2), 145 – 155.

SMAKHTIN, V.U. (2001) – Low Flow Hydrology: a review. Journal of Hydrology. 240, 147 – 186.

SOLON, A.B., CAMPOS, J.N.B, STUDART, T.M.C. (2001) – Estimativas dos Valores Esperados para Durações Máximas de Secas Hidrológicas no Açude Castanhão – CE. 14º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos ABRH, Aracaju, Sergipe.

SVANIDZE, G.G. (1980) – Mathematical Modeling of Hydrologic Series. Water Res. Publ., Fort Collins, Colorado, USA.

ZELENHASIC, E, SALVAI, A. (1987) – A Method of Streamflow Droughts Analysis. Water Resour. Res. 23(1), 156 – 168.

YEVJEVICH, V.(1972) – Stochastic Processes in Hydrology. Water Resour. Publ., Fort Collins, Colorado.