

MÉTODO MONTE CARLO E SIMRES: LABORATÓRIO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE RESERVATÓRIOS

José Nilson Campos¹ e Ticianá Marinho de Carvalho Studart²

RESUMO --- O método Monte Carlo tem sua origem, nos moldes atuais, no projeto Álamo nos Estados Unidos, em 1944. O método ganhou muitos aplicadores e pesquisadores em estudos de fenômenos caracterizados por processos estocásticos. O artigo apresenta uma revisão das metodologias aplicadas em estudos e pesquisas de reservatórios que utilizam simulação Monte Carlo. Apresenta também uma análise das potencialidades do método e seus usos como ferramenta indispensável no arsenal dos engenheiros de recursos hídricos. O programa SIMRES, desenvolvido na Universidade Federal do Ceará, é apresentado como um laboratório de experimentos em hidrologia de reservatórios com uso do método Monte Carlo.

ABSTRACT --- The Monte Carlo Method has its origin in Alamo project in the United States in 1944. The method has gained many applicators and researchers in studies of phenomena characterized by random processes. The article presents a review on the methodologies applied in studies and research of storage reservoir in Brazil semi-arid. It is also presented an analysis of the potentialities of the method and its use as indispensable tool in the arsenal of water resources engineers. A description of Program SIMRES, developed in the Federal University of the Ceará, is presented as a laboratory of experiments in studies of storage process.

Palavras-chave: Simulação Monte Carlo, Reservatórios, Semi-Árido

¹ Professor Titular Visitante do Departamento de Engenharia Ambiental da UFC. E-mail: nilson@ufc.br

² Professora Associada do Departamento de Engenharia Ambiental da UFC. E-mail: ticianá@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

O método Monte Carlo tem origem em 1944 no âmbito do Projeto Álamo, nos Estados Unidos, quando da criação da bomba atômica. Os matemáticos americanos Von Newman e Ulam necessitavam simular a difusão aleatória de partículas de nêutron e formularam a metodologia a qual foi posteriormente publicada em um artigo científico com o título “The Monte Carlo Method”. Embora sejam esses os pais e as datas consagradas, a idéia do método remonta ao início do século XX.

O reconhecimento das vazões regularizadas como um processo estocástico foi percebido por Suddler em 1927. Suddler colocava as vazões observadas em forma de carta de baralho e as embaralhava manualmente para obter diferentes séries de vazões afluentes e, em consequência, valores distintos de vazões regularizadas. Esse método era limitado, pois não incorporava, ao modelo, as variações naturais de estatísticas como média e desvio padrão.

Interessante notar o relato de Ulam sobre como concebeu o método. Ele estava com meningite no hospital e para passar o tempo jogava paciência com seu baralho e lhe ocorreu a idéia de que poderia estimar probabilidades através das frequências favoráveis a um dado evento (Burgman, 2005). Ulam, ao contrário de Sudler, já podia dispor de um maior ferramental em matemática e métodos numéricos.

Na década de 1970, o método de Monte Carlo foi largamente aplicado em Hidrologia, especialmente nos trabalhos de Vujica Yevjevich, em estudos dos processos de estocagem de água. Yevjevich considerava que o futuro da Hidrologia seria a utilização complementar de métodos de simulação, como o de Monte Carlo, e métodos analíticos, como a teoria do “range” e Teoria Estocástica dos Reservatórios. Realmente essa tem sido, hoje, a prática em estudos mais elaborados.

A metodologia tem sido largamente aplicada em estudos e pesquisas do processo de estocagem de águas no Nordeste brasileiro. Campos(1996) usou essa técnica para desenvolvimento do método do Diagrama Triangular de Regularização. O grupo do LEHIDRO - Laboratório de Estudos de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, tem aplicado a metodologia na geração do conhecimento de aspectos ligados ao dimensionamento e operação de reservatórios.

Este artigo apresenta uma síntese conceitual de simulação Monte Carlo, os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia para estudos de reservatórios no Semi-Árido e o desenvolvimento do programa SIMRES como ferramenta para experimentos com estocagem de águas em reservatórios/barragens.

2. SÍNTESE CONCEITUAL: AS ETAPAS DO MÉTODO MONTE CARLO

O método Monte Carlo consiste, basicamente, na geração de séries sintéticas que representam um dado fenômeno (variável aleatória) e a simulação do sistema para verificar seu comportamento (respostas) em diferentes estratégias de operação. É uma ferramenta de muita utilidade para a tomada de decisão sob incertezas.

Em recursos hídricos, a simulação Monte Carlo pode ser resumida nas seguintes etapas:

- Obter os dados históricos do curso de água no local do estudo; caso não haja, procurar por locais de hidrologicamente homogêneos;
- Determinar o regime hidrológico do rio, no local do estudo, utilizando-se técnicas estatísticas e de hidrologia estocástica. O regime do rio pode ser caracterizado pelas seguintes estatísticas: volume afluente médio anual, desvio padrão dos deflúvios anuais, distribuição intra-anual dos deflúvios anuais, regime de evaporação e precipitação no lago (função de probabilidade que melhor se ajusta aos dados);
- Determinar com os dados históricos, por meio de técnicas estatísticas, os parâmetros da função de probabilidade selecionada – não avalia incertezas;
- Caracterizar o sistema hidráulico – reservatório, no presente caso – e determinar as regras de operação previstas para o sistema;
- Simular o sistema com a série histórica e verificar qual teria sido o comportamento do sistema caso as regras de operação houvessem sido obedecidas;
- Gerar séries sintéticas de longa duração (para vazão de equilíbrio) ou várias séries para determinar o comportamento do sistema na fase transiente (avaliar incertezas e variabilidades estocásticas)
- Fazer uma síntese dos resultados através de curvas e indicadores.

3. OS CONCEITOS DE FASE TRANSIENTE E ESTADO DE EQUILÍBRIO EM RESERVATÓRIOS

Até a metade do século passado, os reservatórios eram dimensionados utilizando-se somente a série histórica, o que significa, no contexto da Estocástica, em apenas *uma* realização de um processo de infinitas possibilidades. A inserção do estado de equilíbrio nos estudos de reservatórios dá-se em 1954, quando Moran apresentou a teoria de matrizes de transição aplicada ao dimensionamento de reservatórios.

Nas décadas de 1960 e 1970, no âmbito do desenvolvimento da teoria do “Range” aplicada ao dimensionamento de reservatório, os conceitos de fase transiente e fase de equilíbrio foram

introduzidos nos estudos hidrológicos, principalmente com aplicação de simulação Monte Carlo. Em essência, a fase transiente é aquela na qual o volume inicial atribuído ao reservatório exerce influência nos resultados. Somente com a aplicação do método Monte Carlo torna-se possível avaliar as fases transiente e de equilíbrio em processos de estocagem de águas. As duas fases são definidas mais detalhadamente a seguir.

3.1 – A fase transiente

Suponha-se o seguinte experimento: São geradas M séries sintéticas de N anos de vazões afluentes a um reservatório superficial. Em seguida o reservatório é simulado, para as M séries sintéticas, para uma condição de contorno definida por um volume inicial (S_0) e uma garantia pré-fixada. A vazão regularizada obtida (M) é uma variável aleatória da forma:

$$M = \phi(S_0, N, \bar{X}, \bar{Y}) \quad (1)$$

Onde M é a vazão regularizada em estado transiente, S_0 o volume atribuído ao reservatório para o tempo inicial (t_0), N o número de anos da simulação e X vetor que reúne as características do regime hidrológico tais como deflúvio médio, coeficiente de variação, evaporação e precipitação sobre o lago e Y é um vetor com características morfológicas do reservatório, tais como capacidade e as relações cota x área x volume.

Simulando-se muitas séries sintéticas de vazões afluentes para diversos valores do horizonte de simulação e distintas condições iniciais pode-se conhecer bem o comportamento da variável aleatória vazão regularizada. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática dos valores médios da vazão regularizada (eixo das ordenadas) em função do horizonte de simulação (eixo das abscissas) para as condições iniciais de reservatório cheio e seco.

A fase transiente é aquela na qual os valores da vazão regularizada para o reservatório inicialmente cheio são diferentes dos valores para o reservatório inicialmente seco. Essa diferença tende para zero quando o horizonte de simulação tende para infinito. Studart estimou para as condições do Semi-Árido que, para um horizonte de 5000 anos, o valor do coeficiente de variação das vazões regularizadas é de 0,028.

Em essência tem-se:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (E \{ M(N, S_0) \}) = M^* \quad \forall S_0 \quad 2.a$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (Var \{ M(N, S_0) \}) = 0 \quad \forall S_0 \quad 2.b$$

Onde $E\{M(N,S_0)\}$ representa o valor esperado do volume regularizado para um horizonte de simulação N com o reservatório inicialmente com um volume S_0 e Var denota a variância.

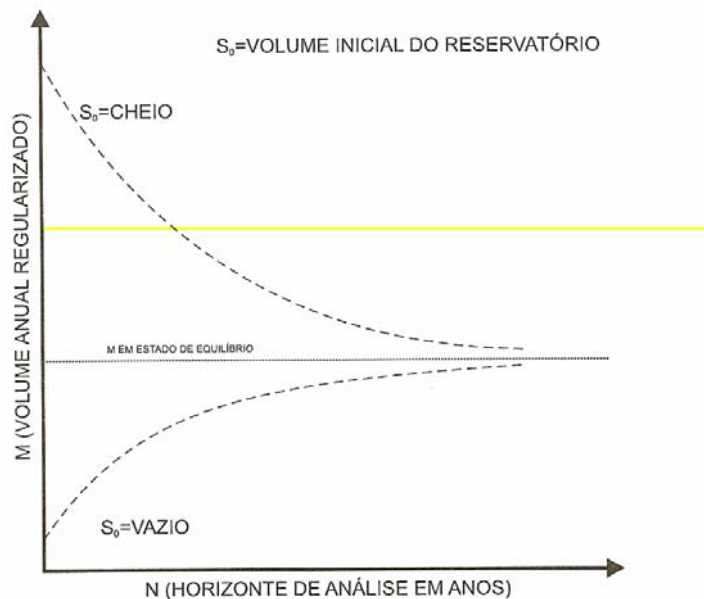


Figura 1 Representação esquemática das relações entre vazão regularizada e horizonte de simulação para duas condições iniciais. Fonte: Campos (2005)

A variável aleatória M é caracterizada por uma média m_N , um desvio padrão s_N , e uma função de probabilidade. Campos e Sousa Filho (2005) calcularam a vazão regularizada para o reservatório Castanhão no vale do Jaguaribe, no Estado do Ceará, e obtiveram o histograma mostrado na Figura 2. A variável M ajustou-se a uma distribuição normal com média $M=$ e coeficiente de variação $CV = 0,32$. É interessante observar que o valor do coeficiente de variação da vazão regularizada para 30 anos é da mesma ordem de grandeza do CV para chuvas anuais do Semi-Árido.

3.2– O estado de equilíbrio

O conceito de vazão regularizada em estado de equilíbrio em dimensionamento de reservatório é aplicado pela primeira vez com o trabalho inovador de Moran (1954) ao formular a teoria das matrizes de transição aplicada ao processo de estocagem de águas. Tem-se:

$$M^* = \phi(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (2)$$

Onde M^* denota a vazão regularizada em Estado de Equilíbrio e X e Y têm o mesmo significado da Equação 1.

Dessa maneira quando o horizonte de análise tende para infinito, o volume anual regularizado na fase transiente tende para um valor denominado volume anual regularizado em estado de

equilíbrio, denotado por M o qual é independente das condições iniciais do reservatório. Por sua vez, a variância do volume anual regularizado tende para zero. A representação gráfica desse processo pode ser vista esquematicamente na Figura 01.

2.3– O conceito de vazão de referência

Em algumas leis estaduais de água, adota-se como vazão máxima a outorgar uma percentagem da denominada *vazão de referência*. Na lei do Estado do Ceará, adota-se o valor de 90% do volume anual regularizado com 90% de garantia anual. Se a sistemática de estimar o valor da vazão de referência não ficar definida, a vazão de referência passa a ter propriedades de uma variável aleatória e poderia *variar significativamente*. Dessa forma, a vazão em estado de equilíbrio, em sendo uma característica constante do sistema, pode ser mais apropriado para o caso. Contudo, há outras alternativas como será descrito a seguir.

2.1.1 O uso de uma série longa de 5.000 anos

Alguns praticantes da Engenharia Hidrológica podem estranhar o uso de uma série de 5.000 anos para a determinação da uma vazão regularizada para uma obra na qual o horizonte de planejamento não supera 50 anos, ou eventualmente 100 anos. De fato, planejar uma obra para 5.000 anos poderia ser pensado como um sonho de faraós egípcios, que não se concretizou, pois suas tumbas foram violadas. Entretanto, há de se fazer a diferença entre horizonte de simulação e horizonte de planejamento.

O horizonte de planejamento é utilizado para avaliar o dimensionamento e os processos de alocação de águas baseados em uma vazão de referência. O horizonte de simulação é usado para estudar o comportamento do sistema e separar a fase transiente da fase de equilíbrio. O uso de séries longas decorre da necessidade de garantir uma vazão regularizada com variância nula e também do fato desses 5.000 anos não implicarem em grandes esforços computacionais.

2.1.2 O uso de n séries sintéticas

Quando o estudo é feito na fase transiente, o procedimento consiste em simular M séries sintéticas de vazões de horizonte de planejamento N . A questão em debate passa a ser quantas séries (M) de N devem ser simuladas. O problema já vem sendo debatido desde a década de 1960.

O dimensionamento e os processos de alocação de águas são baseados em uma vazão de referência. O problema passa a ser quantas séries sintéticas utilizar para se avaliar com precisão, no sentido estatístico, o valor esperado e a variância da vazão regularizada para um horizonte de tempo N e uma condição inicial S_0 . Kelman (1987), em um exemplo didático, usa 1.000 séries de extensão igual ao horizonte de planejamento.

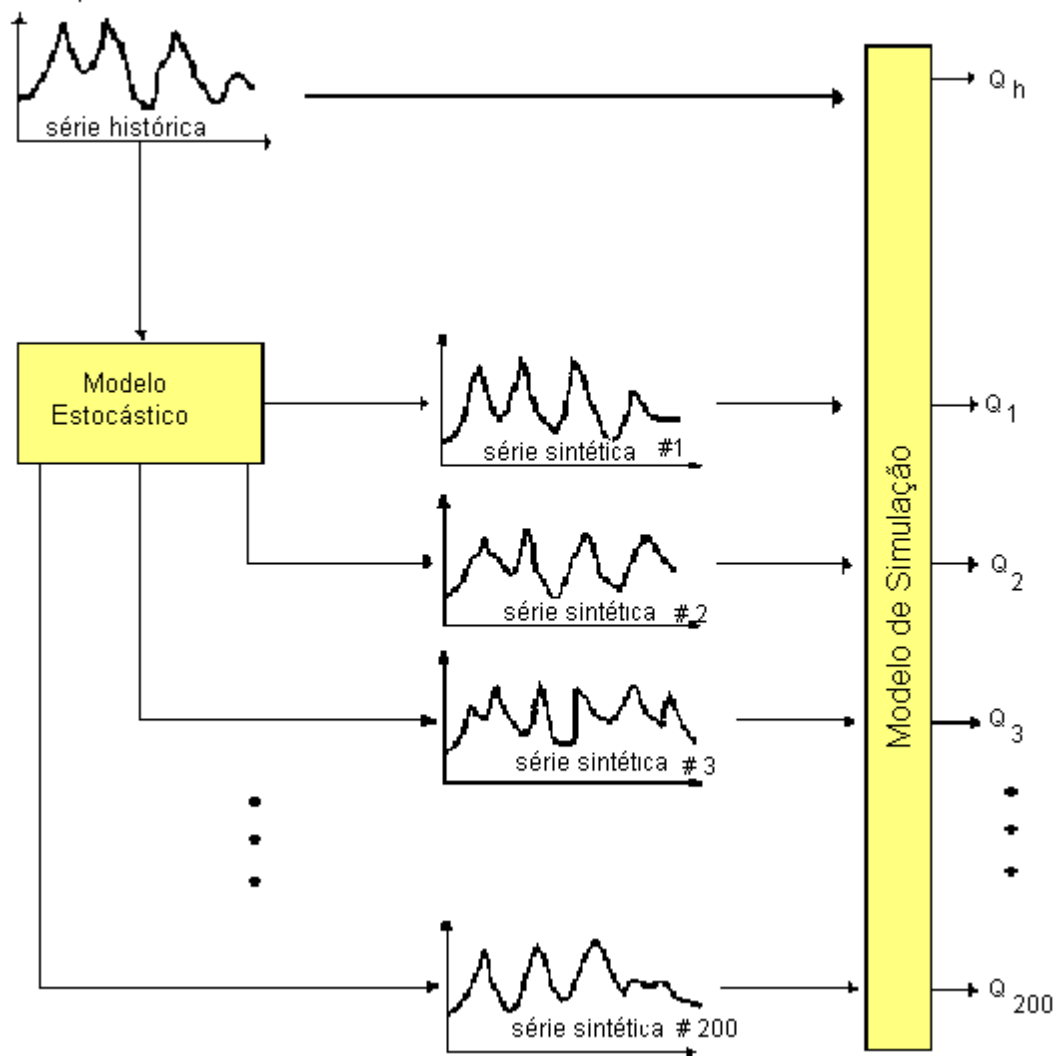


Figura 2. Representação do Método de Monte Carlo Fonte: adaptado de Kelman(1987)

2.1.3 O uso somente da série observada.

O uso somente da série observada para avaliar a vazão regularizada, ou vazão de referência, embora ainda seja praticado, não é recomendado por especialistas em processos estocásticos, tema onde estão inseridos os estudos dos processos de estocagem de águas. Kelman (1987), como renomado especialista, argumenta:

“Como a série histórica é apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico, pode-se imaginar que a natureza “sorteou” a série histórica segundo algum conjunto de leis probabilísticas. Um novo sorteio resultaria em uma outra série, diferente da histórica, mas igualmente provável. (...) Cada sorteio estará associado a uma série de vazões, chamada série sintética. Como essas séries serão todas distintas entre si, podem-se obter diversos resultados provenientes de simulações, ao invés de um único resultado que seria

obtido caso apenas a série histórica estivesse disponível. Dessa forma a informação contida na série histórica pode ser mais completamente extraída” .

Assim, a aplicação da série histórica, pura e simples, significa deixar de usar informações nelas contidas, apesar de existirem técnicas matemáticas disponíveis. Significa também deixar de dar informações sobre as variabilidades inerentes ao processo de estocagem de águas.

3. O PROGRAMA SIMRES COMO LABORATÓRIO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Esses procedimentos estatísticos de simulação Monte Carlo têm tido inúmeras aplicações em projetos e em trabalhos acadêmicos, principalmente com o uso do Programa computacional SIMRES. O SIMRES é um programa em construção que vem sendo usado na Universidade Federal do Ceará em muitos trabalhos, teses de doutorado e dissertações de mestrado.

O SIMRES constitui-se em vários programas desenvolvidos inicialmente em linguagem FORTRAN, a qual apresenta limitações no aspecto visual. Assim, foi desenvolvida uma interface em DELPHI para facilitar a integração dos programas, as entradas de dados, inserir recursos gráficos e melhorar o visual do Programa. Essa parte foi desenvolvida, parcialmente, por um bolsista de Iniciação Científica (David Ganem). Quando o bolsista formou-se engenheiro, o programa ainda não estava totalmente concluído e ficou paralisado. Contudo, trata-se de um programa que pode ser dominado e executado com alguns pequenos problemas.

O SIMRES dispõe dos seguintes recursos:

- Geração de séries sintéticas anuais, modelo simultâneo e mutuamente exclusivo, em funções gama, log-normal e normal;
- Fragmentação da série anual em séries mensais, ou sazonais, utilizando o método de Svanidze(1980);
- Simulação de operação de reservatórios para N séries sintéticas de M anos- è possível simular até 10 diferentes capacidades e 10 diferentes garantias no fornecimento de água;
- Simulação de reservatórios para séries longas – estado de equilíbrio – para até 5000 anos;
- Ferramentas de estatísticas e histogramas das vazões afluentes;
- Ferramentas de operações lineares com arquivos imagem *tape3* para permitir somar deflúvios e sangrias e operar reservatórios em sistemas em série;
- Ferramentas para avaliar as estatísticas dos deflúvios (arquivo imagem *tape3*);

- Ferramentas para avaliar as estruturas das falhas no fornecimento de água pela teoria dos *runs*.

Todas essas ferramentas estão implementadas, porém no caso de erro nos dados o programa ainda apresenta instabilidades e tem comportamento *estranho*. O programa esteve algum tempo disponível na internet para uso acadêmico porém foi retirado para fazer os ajustes na interface programada em Delphi.

As telas de entrada do programa, dos dados gerais dos reservatórios são apresentadas nas figuras 2, 3 e 4.

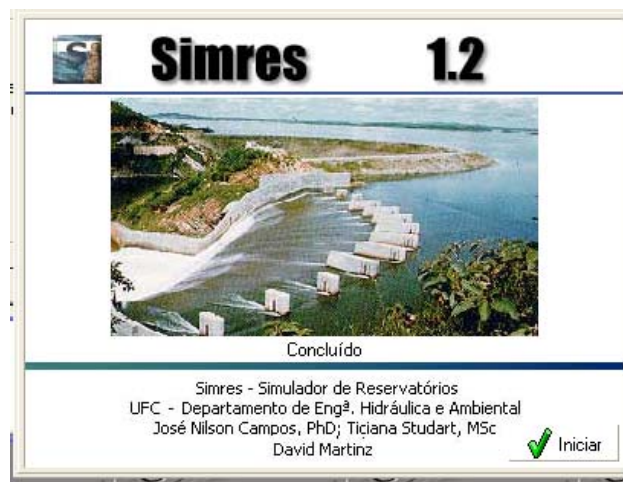


Figura 2 - Tela de abertura do Programa SIMRES

g[1]	80
g[2]	90.00

Figura 3- Tela de entrada de dados gerais dos reservatórios

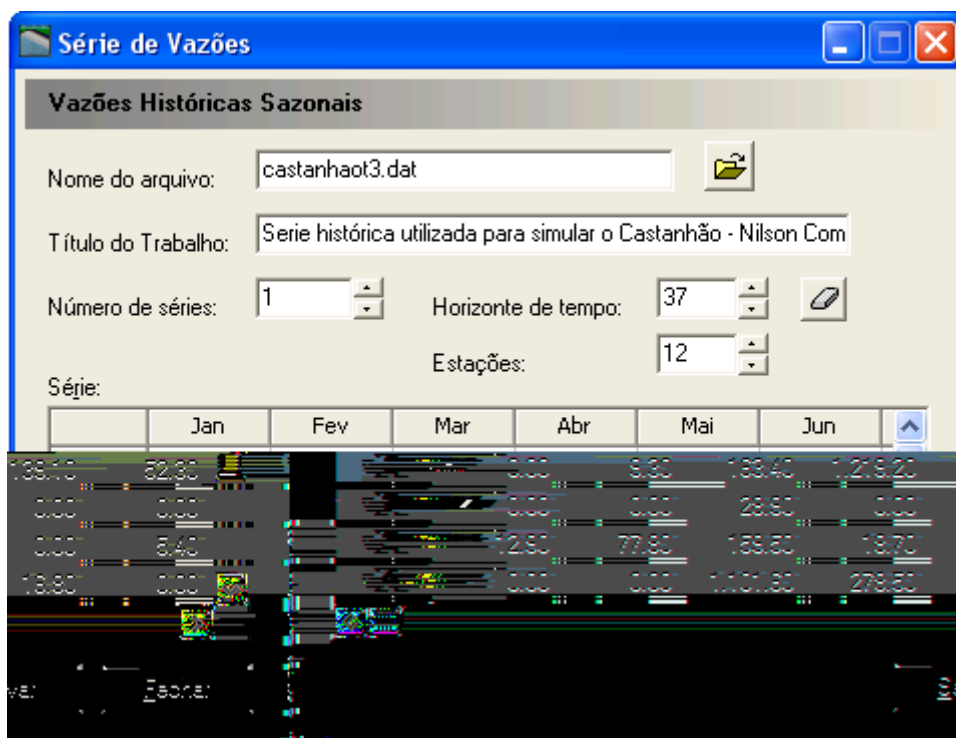


Figura 3- Tela de entrada de dados volumes afluentes anuais.

4. CONCLUSÕES

A técnica de simulação Monte Carlo tem contribuído significativamente para o entendimento das incertezas e dos riscos inerentes aos processos de estocagem de águas em reservatórios-barragens. A determinação de uma vazão de referência para delimitar o volume de referência de uma bacia hidrográfica ou para o dimensionamento de um reservatório pode advir de diferentes conceitos como: vazão regularizada em estado de equilíbrio, estatísticas das vazões regularizadas na fase transiente ou vazão regularizada empírica obtida da série histórica.

O conceito de vazão regularizada em estado de equilíbrio é uma alternativa para estimativa da vazão de referência e apresenta como vantagem ser uma característica do sistema e não uma variável aleatória. A vazão em estado de equilíbrio representa o ponto de convergência das vazões regularizadas na fase transiente e tem variância zero. O Um horizonte de simulação de 5000 anos tem sido usado para garantir a variância nula e considerando que o tempo computacional é ainda bastante curto.

O conceito de vazão regularizada média para em estado de equilíbrio é uma alternativa para estimativa da vazão de referência e apresenta como vantagem ser uma característica do sistema e

não uma variável aleatória. A vazão em estado de equilíbrio representa o ponto de convergência das vazões regularizadas na fase transiente e tem variância zero.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq, pelo apoio a pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

BURGMAN, M. (2005) *Risk and Decisions for Conservation and Environmental Management*. Cambridge University Press. Cambridge.

CAMPOS, J. N. B (1996) *Dimensionamento de Reservatórios – O Método do Diagrama Triangular de Regularização*, Edições UFC. Fortaleza, Ceará;

CAMPOS, J. N. B (2005) *Dimensionamento de Reservatórios – O Método do Diagrama Triangular de Regularização*, 2 ed. Expressão Gráfica. Fortaleza, Ceará;

KELMAN, J. (1987). *Modelos estocásticos no gerenciamento dos recursos hídricos*. In: Barth et. al. Modelos para gerenciamento dos recursos hídricos. São Paulo Nobel: ABRH..

MORAN, P. A. P., (1996) *A Probability Theory of Dams and Storage System*. Australian Journal of Applied Science. V. 6,.

STUDART, T.M.C. (2000) *Análise de incertezas na determinação de vazões regularizadas em climas semi-áridos*. Tese de Doutorado, Fortaleza, Ceará. Universidade Federal do Ceará.

SVANIDZE, G.G. (1980) *Mathematical Modeling for Hydrologic Series for Hydroelectric and Water Resources Computation*. Water Resources Publications. Fort Collins, Co.