

O ENSINO E A AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS HIDROLÓGICAS USANDO SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

José Nilson B. Campos¹ e Ticiano Marinho de Carvalho Studart²

RESUMO

O artigo apresenta uma experiência de *aprender fazendo* sobre as incertezas inerentes ao processo de dimensionamento hidrológico de reservatórios superficiais. A experiência teve lugar no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará em curso promovido pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará e patrocinado pelo Banco Mundial e Ministério do Meio Ambiente no âmbito de programa PROÁGUA. O curso constou na aplicação do método de Monte Carlo para o dimensionamento hidrológico do reservatório Castanhão, no rio Jaguaribe. Foram geradas 30 séries sintéticas de vazões e cada aluno efetuou o dimensionamento do seu reservatório através de três metodologias distintas. Em um segundo momento, os estudantes foram reunidos em grupos de seis e lhes foi atribuída a tarefa de tomada de decisão com o conhecimento dos resultados das seis séries sintéticas do grupo. Os resultados do trabalho apontaram grandes variabilidades nas capacidades obtidas em função das séries estocásticas.

Palavras-chaves: Incertezas Hidrológicas, Ensino de Hidrologia, Reservatórios

ABSTRACT

The article presents an academic experience of *learning doing* in the subject of reservoir sizing and its inherent uncertainties. The experience had room in the Department of Hydraulics and Environmental Engineering in Federal University of Ceará. The course was promoted by Secretariat of Water Resources (SRH) and sponsored by the Ministry of the Environment of Brazil and World Bank in the context of PROÁGUA. The course consisted in the application of Monte Carlo's method for the sizing Castanhão reservoir in the Jaguaribe River. Thirty inflows synthetic series were generated for each student and they were asked to size their own reservoir. In a second moment, the students were gathered in groups of six and it was attributed to them the task of deciding about the reservoir capacity, knowing the results of the six synthetic series of the group. The paper presents the didactical methodology and the results from a group of twelve students.

Keywords: Hydrological Uncertainties, Reservoirs, Engineering Education

INTRODUÇÃO

O estudo da regularização de vazões em reservatórios superficiais constitui-se em uma das principais tarefas dos profissionais de planejamento de recursos hídricos. Os

primeiros estudos de vazões regularizadas remontam ao século XIX, quando eram utilizadas somente fórmulas empíricas. Um avanço metodológico ocorreu em 1883 com o trabalho de Rippl (Rippl, 1883), que propôs o diagrama de massas que passou também a ser

¹ PhD, Professor Titular do Departamento de Eng^a Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, membro da Associação Brasileira de Recursos Hídricos e da International Water Resources Association. Campus do Pici - Centro de Tecnologia - Bloco 713 - Fortaleza - Ceará - Brasil - CEP 60.451-970 - Fone: (085) 288.9623 - Fax: (085) 288.9627 - e-mail: nilson@ufc.br

² Doutora, Professora Adjunto do Departamento de Eng^a Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, membro da Associação Brasileira de Recursos Hídricos e da International Water Resources Association. Campus do Pici - Centro de Tecnologia - Bloco 713 - Fortaleza - Ceará - Brasil - CEP 60.451-970 - Fone: (085) 288.9623 - Fax: (085) 288.9627 - e-mail: ticiano@ufc.br

conhecido como *Método de Rippl*. O Método de Rippl estima a capacidade requerida por um reservatório para regularizar o deflúvio médio afluente, baseado no conhecimento da série histórica desses deflúvios. Mesmo com limitações detectadas, este método, ainda hoje, decorrido mais de um século, mantém muitos simpatizantes.

Entretanto, o Método de Rippl não se mostrou muito adequado para aplicação nos rios intermitentes do Semi-Árido Brasileiro. Em 1937, o engenheiro Francisco Aguiar desenvolveu um método para aplicação nessa Região. O *Método de Aguiar* baseou-se na hipótese da capacidade requerida por um reservatório depender fundamentalmente da média e do desvio padrão dos deflúvios anuais. O método de Aguiar teve algumas aplicações no Nordeste e foi substituído pela regra do 2Va, pela qual a capacidade requerida por um reservatório seria igual a duas vezes o volume afluente médio anual. A prática do 2Va persistiu como prática da engenharia do DNOCS por muitos anos, só tendo sido substituída por métodos mais modernos a partir do final da década de 1960 e início da década de 1970.

Convém ressaltar que os métodos abordados são todos de natureza empírica e o processo de armazenamento em reservatórios é um processo reconhecidamente estocástico. O reconhecimento da natureza estocástica desse processo é devido a Sudler (1927) que, para criar séries sintéticas de deflúvios, embaralhou manualmente as vazões históricas colocadas em cartas de baralho. Embora limitado, este método significou um grande avanço perante a metodologia até então utilizada, sendo considerado o primeiro modelo verdadeiramente estocástico de geração de vazões da história. Porém, foi somente com o advento do computador e o conseqüente avanço dos métodos numéricos é que o tratamento estocástico do processo de armazenamento de águas ganhou maior impulso.

Todavia, as incertezas e a variabilidade de muitas grandezas hidrológicas nem sempre são aceitas e praticadas por engenheiros. A formação tradicional do Engenheiro Civil é, na maioria das vezes, extremamente determinística, dirigida que é pelos métodos de

cálculo estrutural e da construção civil. Essa formação, no entanto, é limitante para um bom planejamento de recursos hídricos, principalmente no que diz respeito ao estudo de vazões regularizadas.

Dessa forma, a experiência didática apresentada no curso teve como objetivos: 1) mostrar, e ensinar, aos alunos o tratamento prático do processo de estocagem de água como um processo estocástico, 2) avaliar incertezas no dimensionamento de reservatórios através do desenvolvimento de uma pesquisa aplicada durante o desenvolver do curso; 3) despertar o espírito crítico dos alunos quanto à aplicação de métodos de engenharia e tomadas de decisões. O presente artigo relata a experiência e os resultados obtidos aplicados ao açude Castanhão.

A ORGANIZAÇÃO DIDÁTICA DO CURSO

O curso foi organizado em quatro módulos: módulo de conceitos estatísticos básicos; módulo de estudos das vazões médias (regularização de vazões); módulo de estudos de cheias (dimensionamento do vertedouro) e módulo de impactos ambientais.

No módulo de estatística foram apresentados os conceitos de variável aleatória, funções de probabilidade, processos estocásticos e também o método de Monte Carlo. Na módulo de estudos de regularização de vazões apresentaram-se os métodos de estimativa de vazões regularizadas e de dimensionamento de reservatórios. No módulo de estudos de cheias procedeu-se ao dimensionamento da estrutura do vertedouro. O módulo de impactos ambientais apresentou os principais impactos decorrentes do barramento dos rios para a formação de reservatórios artificiais.

O procedimento didático adotado para o curso visou: 1) dar aos alunos a sensibilidade quanto as incertezas envolvidas no processo hidrológico de estocagem de águas em reservatórios; 2) ensiná-los metodologias de dimensionamento de reservatórios e avaliação de vazões regularizadas; 3) introduzir os alunos no processo de tomada de decisão sob incertezas; 4) treiná-los no trabalho de equipe atribuindo, a cada um, uma tarefa específica e

a obrigação de concluí-la para que o grupo pudesse ter seu trabalho finalizado.

O curso foi organizado de acordo com a seguinte seqüência: 1) a turma foi dividida em cinco grupos de seis alunos; 2) cada aluno recebeu uma série sintética de vazões anuais de 30 anos, extraídas de uma população gama com média $1.463\text{m}^3/\text{s}$ e desvio padrão $2.063\text{m}^3/\text{s}$ (valores inferidos para o açude Castanhão em estudo recentemente procedido pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará).

Foram procedidas aplicações à medida que a teoria era transmitida. As aplicações consistiram de trabalhos individuais e de equipe. No final do curso, coube aos professores proceder uma análise dos resultados para apresentação ao conjunto dos estudantes. Os resultados, após sistematizados, puderam ser sintetizados em forma de um trabalho de pesquisa. Os trabalhos individuais e de equipe estão relacionados a seguir.

Os trabalhos individuais

A cada estudante foi pedido proceder, com sua série personalizada, as seguintes tarefas:

- Fragmentar a série sintética anual em série mensal usando o método dos Fragmentos (Svanidze, 1980), tendo como referência a série histórica adotada no Projeto Castanhão;
- Coletar dados climáticos e geomorfológicos do reservatório Castanhão, em construção no rio Jaguaribe, no estado do Ceará;
- Caracterizar estatisticamente o regime dos deflúvios afluentes ao reservatório do Castanhão;
- Calcular a capacidade requerida para o reservatório pelos métodos de Rippl, de Aguiar e do $2Va$;
- Calcular a vazão regularizada pelo reservatório através do método do Diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996) e a partir de simulações usando o programa SIMRES (Campos, Studart, Martinz e Coêlho, 2000).

Os trabalhos em equipe

O trabalho de equipe teve com objetivo desenvolver a capacidade de colaboração entre os componentes dos grupos e próprio exercício do *trabalhar em equipe*. Às equipes foram solicitadas as seguintes tarefas:

- Analisar os resultados individuais dos componentes da equipe;
- Tomar uma decisão sobre qual seria a vazão regularizada e a capacidade do açude considerando-se conhecidas as seis séries de volumes afluentes;
- Desenvolver os estudos da cheia de projeto e proceder o dimensionamento do vertedouro;
- Apresentar os resultados obtidos pelos grupos aos demais treinandos.

CONCEITOS BÁSICOS EM DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS

O projeto do curso de dimensionamento de reservatórios utilizou alguns conceitos básicos de hidrologia. Tendo em vista mostrar a evolução de processos empíricos de dimensionamento, foram selecionados três métodos para análise, a saber: método de Rippl, método de Aguiar e a fórmula empírica do $2Va$.

O método de Rippl

O método de Rippl foi formulado em 1983 e consistia em traçar o diagrama de massas dos deflúvios acumulados conforme a seqüência a seguir.

- Selecionar a série histórica de vazões fluviais afluentes a o reservatório;
- Traçar o diagrama de massas, consistindo em colocar no eixo das ordenadas os valores acumulados dos volumes afluentes e no eixo das abcissas o tempo;
- Traçar a linha de demandas, ligando a origem dos eixos ao ponto mais extremo do diagrama de massas;

- Traçar paralelas à linha de demanda nos pontos mais afastados nos lados superiores e inferiores;
- A diferença vertical entre as duas paralelas é considerada igual à capacidade requerida pelo reservatório para regularizar a média das vazões afluentes.

Mesmo cem anos depois de formulado, o método de Rippl ainda tem fiéis seguidores. Por exemplo, Sharma (1983) aponta o método da curva de massas *“como o melhor método para fixar a capacidade de um reservatório.”*

O método do engenheiro Aguiar

Aguiar desenvolveu seu método de dimensionamento de capacidades requeridas por reservatórios superficiais em 1937. Aguiar (1978, reprint), tinha plena convicção de que a capacidade a ser atribuída a um reservatório seria fortemente influenciada pela variabilidade dos deflúvios e argumentou que *“no caso de todos os anos da série escolhida apresentarem a mesma altura de chuva, H , a precipitação média absoluta seria ainda igual a H e, portanto, não haveria necessidade de armazenar água de um ano para outro”*. O método do engenheiro Aguiar consiste nas seguintes etapas de cálculo:

- Ordenar as séries de chuvas anuais em forma crescente;
- Separar a série ordenada em duas partes iguais; as maiores precipitações formam a série de máximas e as menores formam a série de mínimas.
- Calcular a média das chuvas da série de máximas (H_{\max})
- Calcular a média das chuvas da série de mínimas (H_{\min})
- Fazer a capacidade do reservatório igual ao volume escoado estimado aplicando-se a fórmula polinomial de chuva x deflúvio ao valor de H_{\max} ;
- Calcular o volume regularizado pelo reservatório aplicando-se a fórmula polinomial a H_{\min} .

O método de Aguiar, acima referido, teve pouca aplicação no Nordeste. Os técnicos do

DNOCS optaram por aplicar a fórmula empírica do 2Va descrita a seguir.

A fórmula empírica do 2Va

Durante muitos anos, a capacidade dos reservatórios do Nordeste foi calculada a partir de uma metodologia muito simples. O método consistia em:

- Selecionar a precipitação média no local de construção da barragem;
- Estimar o deflúvio médio anual pela fórmula polinomial de Aguiar (1978, reprint)
- Fazer a capacidade igual a 2Va.

Talvez porque a capacidade decorresse diretamente da fórmula empírica de estimativa dos deflúvios de Aguiar, essa metodologia é ainda muito atribuída ao engenheiro Aguiar e ainda hoje tem seus defensores. Devido ao grande prestígio da fórmula, a mesma foi inserida na análise comparativa.

O método experimental

O método experimental consiste na geração sintética de séries de vazões afluentes aos reservatórios e na verificação, por simulação, de qual teria sido o comportamento do reservatório, nas séries sintéticas de vazões, se determinadas regras de operação houvessem sido seguidas. Das análises das simulações, executadas com o programa SIMRES (descrito na próxima seção), chega-se ao dimensionamento do reservatório.

O SIMRES COMO LABORATÓRIO

Para o desenvolvimento dos trabalhos individuais e de equipe foi apresentado aos alunos o programa computacional *SIMRES: Laboratório Computacional de Reservatórios* (versão beta) (Campos, Studart, Martinz e Coêlho, 2000). O programa foi desenvolvido, em sua primeira versão, em FORTRAN, em 1987, na Colorado State University. Recentemente, o programa foi substancialmente melhorado com rotinas de pré e pós processamento na Universidade Federal do Ceará, no âmbito do projeto Gerenciamento dos Aspectos Quantitativos e

Qualitativos dos Recursos Hídricos do Semi-Árido, com financiamento do CNPq.

O SIMRES, desenvolvido com vistas ao dimensionamento de reservatórios, utiliza a simulação Monte Carlo, e tem as seguintes características:

- Geração de séries sintéticas anuais em populações Gama, Log-normal e Normal;
- Fragmentação das séries anuais em séries mensais;
- Avaliação das vazões regularizadas para garantias a nível mensal ou anual;
- Avaliação das frequências de falhas anuais e mensais para até dez retiradas e dez diferentes capacidades;
- Capacidade para avaliar as regularizações de vazões em estado de equilíbrio (séries sintéticas de até 5.000 anos);

- Capacidade de tratar, em uma única execução, com até 100 séries de 50 anos (número de séries vezes o número de anos de menor ou igual a 5.000);
- Ferramentas de soma de arquivos de deflúvios (denominado imagem tape3.dat) para propiciar a análise de sistemas de reservatórios;
- Ferramenta de gráficos.

O programa está disponível na Internet no endereço <http://www.deha.ufc.br/nilson/simres>.

OS RESULTADOS

Para efeito do presente artigo, foram selecionados os trabalhos desenvolvidos por doze alunos agrupados em dois grupos de seis. A Tabela 1 apresenta a média e o coeficiente de variação das vazões afluentes utilizadas por cada grupo.

Tabela 1 - Valores da capacidade requerida pelo açude Castanhão, por três métodos e para diferentes séries estocásticas.

	Aluno	Deflúvios anuais		Capacidade requerida		
		Média (hm ³)	CV	Rippl (hm ³)	Aguiar (hm ³)	2Va (hm ³)
GRUPO 1	Sueli	962,95	0,98	5185,19	1769,46	1925,90
	Elano	1410,26	1,23	8786,40	2578,68	2820,52
	Goretty	1251,40	1,14	6194,60	2245,57	2502,80
	Inês	1503,84	1,47	11252,90	2867,65	3007,68
	Nelson	1150,30	1,40	8993,10	1769,50	2300,60
	Zita	1056,80	1,44	7305,00	2036,65	2113,60
	Média	1222,59	1,28	7952,87	2211,25	2445,18
	Desvio	189,42	0,18	1993,25	405,76	378,84
	CV	0,15	0,14	0,25	0,18	0,15
GRUPO 2	Luciano	1175,95	1,65	11471,63	2194,49	2351,90
	Socorro	1300,83	1,04	6335,38	2291,00	2601,66
	Paulo	1543,15	1,77	7422,27	2935,04	3086,30
	Gianni	1184,57	1,46	8007,28	2258,39	2369,14
	Alexandre	1109,66	1,35	6137,87	2115,13	2219,32
	Tomé	2153,74	1,20	13889,75	3939,30	4307,48
	Média	1411,32	1,41	8877,36	2622,23	2822,63
	Desvio	360,23	0,25	2848,83	647,40	720,46
	CV	0,26	0,18	0,32	0,25	0,26
RESULTADO DOS DOIS GRUPOS						
G 1 e G 2	Média	1316,95	1,34	8415,11	2416,74	2633,91
	Desvio	316,33	0,24	2612,86	603,72	632,66
G 2	Cv	0,24	0,18	0,31	0,25	0,24

Duas interessantes análises podem ser procedidas a partir dos resultados obtidos dos dois grupos de estudantes. Uma quanto às diferenças dos resultados entre os dois métodos (Aguiar e Rippl) e outra quanto às

variabilidades naturais das capacidades dos reservatórios, devidas ao caráter randômico das séries de deflúvios. Adicionalmente, pode-se verificar a relação entre a capacidade de

Aguiar e deflúvio médio com o objetivo de checar o antigo paradigma *dois Va*.

Diferenças entre Aguiar e Rippl

A análise dos dados da Tabela 1 mostra que as capacidades obtidas pelo método de Rippl são bem maiores do que as obtidas pelo método de Aguiar. Fazendo-se um regressão entre as duas grandezas obteve-se a seguinte equação:

$$K(Rp) = 2,99 \times K(Ag) + 1170 \quad (1)$$

Sendo $K(Rp)$ a capacidade do “Castanhão” (em hm^3) obtida pelo método de Rippl; $K(Ag)$ a capacidade do “Castanhão”(em hm^3) obtida pelo método de Aguiar.

Então, para rios de regime hidrológico similar ao barrado pelo Açude Castanhão, pode-se esperar que a capacidade obtida pelo método de Rippl seja cerca de três vezes superior à obtida pelo método de Aguiar.

Diferenças entre Aguiar e o 2Va

O estudo de regressão das capacidades dos reservatórios encontradas nas doze séries sintéticas selecionadas levou à seguinte relação:

$$K(2Va) = 1,02 \times K(Ag) + 157 \quad (2)$$

Sendo $K(2Va)$ a capacidade do “Castanhão” obtida pelo 2Va, $K(Ag)$ a capacidade do “Castanhão” obtida pelo método de Aguiar e 157, uma constante (todos os valores em hectômetros cúbicos).

Pode-se observar que o valor obtido com a aplicação do 2Va é aproximadamente igual ao valor obtido com o método de Aguiar, adicionado a uma pequena constante. Poder-se-ia, apressadamente, concluir que o 2Va e Aguiar são o *mesmo* método. Todavia, trata-se de uma coincidência, não esperada a priori pelos professores. A relação acima é válida apenas para as condições do experimento, ou seja, coeficientes de variação (CV) em torno de 1,4. Não é difícil verificar que a relação entre a capacidade determinada pelo método de Aguiar e o deflúvio médio tende para *um* quando o valor de CV tende para *zero*.

CONCLUSÕES

O artigo mostrou a aplicação da simulação Monte Carlo como ferramenta para aplicações em Engenharia Hidrológica e também para proceder em sala de aula o ensino e a avaliação de incertezas em Hidrologia, particularmente no que se refere ao dimensionamento hidrológico de rios do Semi-Árido brasileiro.

A metodologia permitiu o aprendizado das seguintes habilidades: 1) a capacidade individual do aluno em proceder um dimensionamento hidrológico a partir de uma única série de dados; 2) a capacidade de trabalhar e criar em equipe, quando cada grupo estudava seus resultados individuais e procurava desenvolver uma metodologia para dimensionamento diante das incertezas; 3) o entendimento das incertezas inerentes aos processos hidrológicos, para evitar o uso metodologias do tipo *siga a seta*, não apropriadas para o estudo do processo em análise.

Em resumo, a metodologia adotada no curso utilizou o método de Monte Carlo como um laboratório, e os alunos com pesquisadores, integrando o processo de aprendizagem e de formação do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará nas pessoas do Secretário Hypérides Pereira de Macedo e da Coordenadora do Programa de Capacitação, Fátima Montezuma. Agradecem ao Programa PROÁGUA, ao Ministério do Meio Ambiente e Banco Mundial pelo patrocínio financeiro do curso. Agradecem a todos aos alunos, a seguir relacionados, pela ativa participação nas tarefas do curso: Afrânio Alves, Alexandre Neto, Elano Joca, Eveline Queiróz, Francisco José, Gerson Martins, Gianni Lima, Gorety Batista, Guilherme Freire, Inês Teixeira, Iuri Macedo, Ivoneide Damasceno, José Maurício, Luciano Falcão, Marcos Vinícius, Maria Uchôa, Mercêdes Menezes, Orinaldo Freitas, Paulo Miranda, Raquel Espíndola, Socorro Araújo, Ticiane Mamede, Thereza Citó e Zita Timbó.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, F.G. *Estudos Hidrométricos do Nordeste Brasileiro. Excertos.* Boletim Técnico do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Fortaleza, Ce. v. 36. n. 2. 1978. p. 129-41.
- CAMPOS, J.N.B. *Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização.* Edições UFC Fortaleza, Ce 1996. 51p.
- CAMPOS, STUDART, MARTINZ E COÊLHO. *SIMRES: Laboratório Computacional de Reservatórios,* 2000 (<http://www.deha.ufc.br/nilson/simres>) .
- RIPPL, W., *Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply.* Proceedings of The Institution of Civil Engineers v. 71, 1883.
- SHARMA R.K. *A Text Book of Hydrology & Water Resources.* J.C. Kapur, 2ed. Nova Delhi, 1983 p. 403
- SUDLER, C.E., *Storage Required for the Regulation of Streamflow.* Transactions of the American Society of Civil Engineers. v. 91, 1927.
- SVANIDZE, G.G. *Mathematical Modeling of Hydrologic Series.* Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1980.

DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES

José Nilson B. Campos



Engenheiro Civil (1967) e Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (1976), PhD em Planejamento de Recursos Hídricos pela Colorado State University (1987), Professor titular da Universidade Federal do Ceará, Autor de 3 livros, 7 capítulos de livros e mais de 50 artigos nacionais e internacionais. Foi Coordenador do Mestrado em Recursos Hídricos da UFC de 1990 a 1994 e chefe do Departamento de Hidráulica da UFC de 1996 a 1998. Integra o corpo docente do Programa de

Pós- Graduação em Recursos Hídricos na UFC.

Ticiania M. C. Studart



Engenheira Civil (1985), Mestre em Recursos Hídricos (1991 e Doutora em Recursos Hídricos (2000) pela Universidade Federal do Ceará. Professora Adjunto da mesma universidade, autora de 2 livros, 3 capítulos de livro e cerca de 35 artigos nacionais e internacionais. Foi coordenadora do Curso de Engenharia Civil da UFC de 1992 a 1996. Atualmente ensina as disciplinas Integra o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos na UFC.