

## XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

# APLICAÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO E ANÁLISE DA CONFIABILIDADE VOLUMÉTRICA EM RESERVATÓRIOS DO NORDESTE BRASILEIRO UTILIZANDO MODELO DE SIMULAÇÃO

*Arthur de Souza Antunes Suassuna<sup>1</sup>; Pedro Gustavo Câmara da Silva<sup>2</sup>; Adelenia Gonçalves Maia<sup>3</sup>*

**RESUMO** – A aplicação de regra de operação em reservatórios no nordeste brasileiro é muito importante para gestão dos reservatórios na região, pois a falta de água tem causado grandes problemas para o abastecimento humano e dessedentação animal. Sendo a regra de operação uma importante ferramenta de gerenciamento dos recursos hídricos no reservatório, foram aplicados dois modelos de curva-guia em sete reservatórios do Rio Grande do Norte. Cada modelo divide o volume útil em duas zonas, sendo em uma zona a restrição de 70% de atendimento da demanda e na outra o atendimento de forma integral da demanda. A operação foi desenvolvida em Visual Basic for Applications, utilizando o microsoft excel. Depois da operação, foi analisado a confiabilidade volumétrica de cada reservatório com base nos dois modelos de curva-guia, sendo identificado em todos os reservatórios que o modelo 2 teve maiores resultados de confiabilidade volumétrica.

**ABSTRACT** – The application of rule of operation in reservoirs in the Brazilian northeast is very important for the management of the reservoirs in the region, since the lack of water has caused great problems for the human supply and animal watering. Since the operating rule is an important tool for the management of water resources in the reservoir, two guide-curve models were applied in seven reservoirs in Rio Grande do Norte. Each model divides the useful volume into two zones, where in one zone the restriction of 70% of demand is met, and in the other, the demand is fully met. The operation was developed in Visual Basic for Applications, using Microsoft Excel. After the operation, the volumetric reliability of each reservoir was analyzed based on the two guide curve models, being identified in all reservoirs that model 2 had higher volumetric reliability results.

**Palavras-Chave** – Regra de operação, Curva-guia.

---

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Ambiental na UFRN. Rio Grande do Norte, Natal, Campus Universitário Lagoa Nova, 59078-970. E-mail: arthursuassuna@gmail.com

<sup>2</sup>Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da UFRN. Rio Grande do Norte, Natal, Campus Universitário Lagoa Nova, 59078-970. E-mail: pedrogustavo@ct.ufm.br.

<sup>3</sup>Professora Adjunta da UFRN. Rio Grande do Norte, Natal, Campus Universitário Lagoa Nova, LARHISA, 59078-900. E-mail: adelenam@gmail.com

## 1 - INTRODUÇÃO

Entre as obras hidráulicas que podem ser criadas para alocação da água para diferentes usos, os reservatórios têm assumido grande relevância ao longo da história (Bravo *et al.*, 2008). Uma das saídas para minimizar ou eliminar o efeito da escassez hídrica é a construção de reservatórios, que tem por finalidade armazenar água do período chuvoso para ser usada no período de seca para atender as demandas consuntivas e não-consuntivas (Vieira *et al.*, 2010).

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 (Oliveira e Celeste, 2016). Sendo a água um recurso muito importante para todos, é fundamental que exista uma boa gestão dos recursos hídricos principalmente no nordeste brasileiro, que possui problemas com escassez de água, procurando sempre aplicar de forma eficiente uma boa gestão e operação dos reservatórios dessa região.

A principal tarefa na operação de um reservatório é decidir a quantidade de água a ser liberada durante um dado período de tempo e o volume que deve ser mantido para uso futuro a partir de algumas informações disponíveis ou previstas no início deste período de tempo (Celeste *et al.* 2010). Na prática, a operação de reservatórios é guiada pelas chamadas curvas-guia, que estabelecem a quantidade de vazão a ser liberada em função do armazenamento atual e, eventualmente, da previsão de afluências futuras (Celeste *et al.* 2016).

A curva-guia é uma regra de operação bastante utilizada, formando zonas dentro do volume útil do reservatório. Cada zona possui um critério de operação, podendo assim alterar o atendimento da demanda conforme a zona que está o nível do reservatório. Segundo Bravo *et al.* (2008), a distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal. Essas regras de operação são usadas para indicar volumes (ou níveis d'água) alvos ou ideais do reservatório visando determinados objetivos.

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação de diferentes curvas-guia como regra de operação em cada reservatório estudado e, posteriormente, analisar a confiabilidade volumétrica do atendimento da demanda para as diferentes curvas-guia adotadas.

## 2 - METODOLOGIA

O desenvolvimento deste estudo foi baseado em sete reservatórios, sendo eles: Cruzeta, Dourado, Marechal Dutra (Gargalheiras), Itans, Boqueirão de Parelhas, Caldeirão de Parelhas e Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (Armando R. G.). Todos os reservatórios estão localizados no Rio Grande do Norte (RN), e são significativos para acumulação de água e atendimento da demanda local. A tabela 1 mostra algumas características dos sete reservatórios estudados e suas localizações.

Tabela 1 – Reservatórios estudados

Reservatório	Latitude	Longitude	Volume Máximo (hm <sup>3</sup> )	Demandas Totais (l/s)
Cruzeta	06° 24' 37,18" S	36° 47' 49,70" W	23,55	154
Dourado	06° 14' 50,07" S	36° 30' 36,34" W	10,32	77
Gargalheiras	06° 25' 32,94" S	36° 36' 6,16" W	44,42	183
Itans	06° 29' 25,65" S	37° 03' 59,74" W	81,75	198
Boqueirão de P.	06° 41' 42,28" S	36° 37' 45,11" W	84,79	93
Caldeirão de P.	06° 42' 15,95" S	36° 41' 23,31" W	9,32	19
Armando R. G.	05° 40' 10,41" S	36° 52' 52,94" W	2.400,00	5.447

Fonte: ANA (2017).

Foi desenvolvido para este artigo um modelo de simulação de operação de reservatório em Visual Basic for Applications (VBA) que é uma linguagem de programação, sendo utilizada juntamente com o Microsoft Excel e por isso o programa pode ser operado em forma de planilha. O modelo desenvolvido tem como objetivo o cálculo do balanço hídrico (mês a mês) e da confiabilidade volumétrica, em cada reservatório. Os dados utilizados na simulação, foram: valores médios mensais de precipitação e evaporação, série histórica de vazão afluente entre 1962 a 2009, cota x área x volume e o valor da demanda total a ser atendida, todos esses dados foram adquiridos da ANA.

O balanço hídrico, realizado dentro do modelo de simulação, é definido por Lanna (2015), e é descrito pela equação 1:

$$S(t + 1) = S(t) + q(t) - D - E(t) + P(t) \quad (1)$$

Sendo  $S(t)$  o armazenamento no início do intervalo de tempo  $t$ ;  $q(t)$  o deflúvio afluente durante o intervalo  $t$ ;  $D$  a descarga operada visando ao suprimento da demanda;  $E(t)$  a evaporação do reservatório durante o intervalo  $t$ ;  $P(t)$  a chuva sobre o reservatório no intervalo de tempo  $t$ ; a

evaporação  $E$  é computada pelo produto de uma taxa de evaporação  $e(t)$ , em altura de lâmina de água evaporada por unidade de tempo, pela área do espelho líquido do reservatório,  $A$ . A chuva sobre o reservatório é calculada pelo produto de uma altura de precipitação por intervalo de tempo  $p(t)$ , pela mesma área do espelho líquido (Lanna, 2015).

A operação realizada em cada reservatório foi baseada em dois modelos de curvas-guia. Os modelos 1 e 2 estão representados respectivamente na figura 1. Cada modelo define uma determinada regra de operação dependendo do volume do reservatório em cada mês.

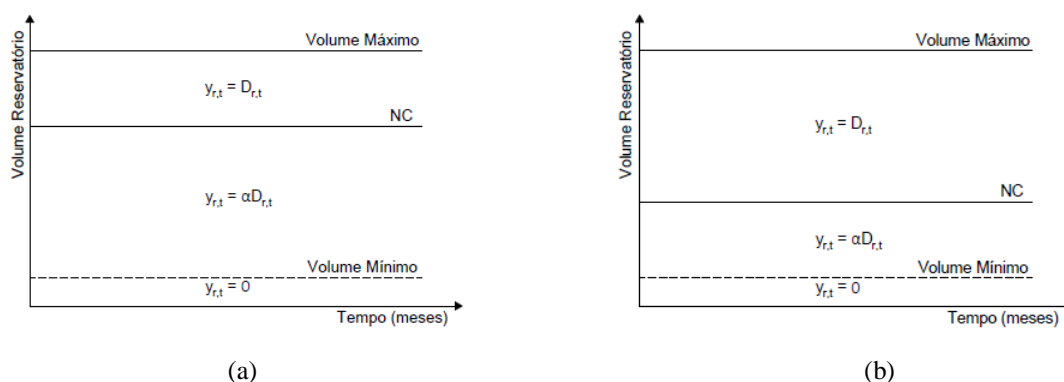


Figura 1 – Curvas-guia adotadas para simulação: (a) modelo 1 e (b) modelo 2.

A figura 1 (a) mostra que o modelo 1 divide o volume útil (entre o volume máximo e o volume mínimo) em duas zonas. A zona entre o volume mínimo e o nível crítico (NC) representa  $2/3$  do volume útil, nela o atendimento da demanda será limitado por um fator  $\alpha$  de 0,7, ou seja, apenas 70% da demanda será atendida. Na zona entre o NC e o volume máximo, que corresponde a  $1/3$  do volume útil, o atendimento da demanda será de forma integral. Caso o volume do reservatório esteja abaixo do volume mínimo, não existirá atendimento da demanda.

A figura 1 (b) mostra que o modelo 2, semelhante ao modelo 1, também divide o volume útil em duas zonas, mas, nesse caso, a zona entre o volume mínimo e o NC corresponde a  $1/3$  do volume útil, nela o atendimento da demanda também será limitado por um fator  $\alpha$  de 0,7. A zona entre o NC e o volume máximo corresponde a  $2/3$  do volume útil, nela o atendimento da demanda será de forma integral. Caso o volume esteja abaixo do volume mínimo, não existirá atendimento da demanda.

Depois de simular a regra de operação em cada reservatório, foi calculado o índice de confiabilidade volumétrica de todos eles para cada modelo de curva-guia. Segundo Fiering's (1967) apud McMahon e Mein (1978), a confiabilidade volumétrica relaciona o volume de água fornecido ao volume de água demandado para o período de estudo da seguinte forma:

$$Rv = \frac{\text{Fornecimento efetivo}}{\text{Demanda}} \quad (2)$$

Foi simulado uma regra de operação em todos os reservatórios, aplicando os dois modelos de curva-guia. Após, foram feitos dois gráficos para cada reservatório, sendo um de cada modelo, e por fim analisado o índice de confiabilidade volumétrica. A confiabilidade volumétrica permite uma avaliação percentual de quanto foi suprido nos períodos de falha, fornecendo aos decisores uma ideia da severidade da situação nos períodos de escassez (Reis, 2002)

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das figuras 2 a 8 são mostrados os gráficos de análise da confiabilidade volumétrica para cada reservatório, sendo comparado em cada um os dois modelos de curva-guia. Pode-se observar que em quase todos os gráficos o modelo de curva-guia 1 obteve menor resultado de confiabilidade volumétrica, mostrando que o fator  $\alpha$  aplicado em 2/3 do volume útil causou uma significativa queda no atendimento da demanda. Vale resaltar que o modelo de curva-guia 2 obteve melhores resultados de confiabilidade volumétrica para todos os reservatórios, sendo sempre maiores que 97%.

É importante destacar dois reservatórios, Dourado e Armando R. G.. O reservatório Dourado foi o que teve maior diferença entre os dois modelos de curva-guia, 8,18% de um modelo para outro, sendo esse o reservatório que mais sentiria o impacto da restrição no atendimento da demanda com base no modelo 1. O reservatório Armando R. G. não teve diferenças significativas entre os dois modelos, estando sempre com uma confiabilidade volumétrica de 98,5%.

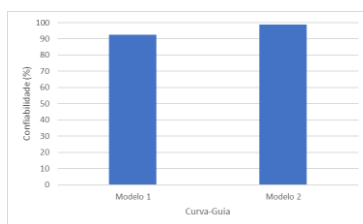


Figura 2 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia Cruzeta

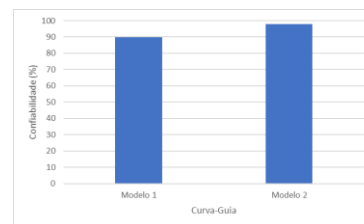


Figura 3 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia Dourado

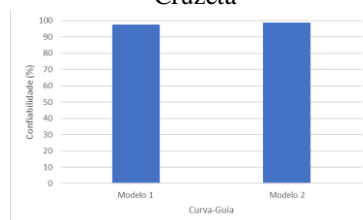


Figura 4 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia Gargalheiras

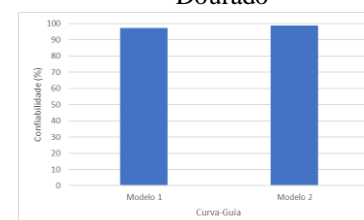


Figura 5 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia Itans

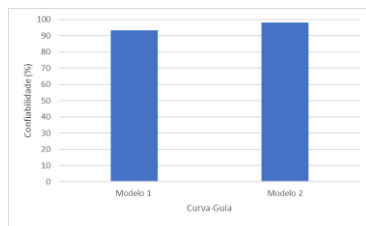


Figura 6 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia Boqueirão de Parelhas

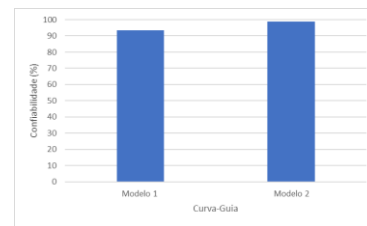


Figura 7 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia Caldeirão de Parelhas

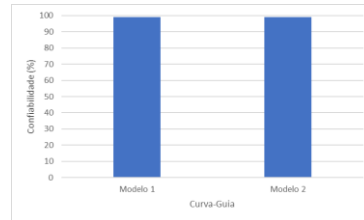


Figura 8 – Confiabilidade volumétrica X Curva-guia - Armando R. G.

## 4 - CONCLUSÃO

A regra de operação em reservatórios tem sido bastante estudada e é uma ferramenta muito importante no gerenciamento e operação dos reservatórios, principalmente na região nordeste brasileira, onde muitos sofrem com a escassez de água. Mesmo o reservatório sendo uma importante obra para minimizar os efeitos da seca nessa região, é importante que exista um excelente dimensionamento e operação do mesmo, assim será possível encontrar soluções mais adequadas para a gestão dos recursos hídricos. Caso exista uma boa operação desses reservatórios, será possível atender de forma eficiente a demanda e minimizar as perdas de água por evaporação ou vertimento.

Podemos perceber que o modelo de simulação foi bem aplicado nos sete reservatórios deste artigo. Foi possível então identificar o melhor modelo de curva-guia para cada um de acordo com suas próprias características. Os resultados dos reservatórios mostraram que, mesmo utilizando dois modelos de curvas-guia, é possível atender a demanda com uma confiabilidade volumétrica acima de 89% em todos os casos, no entanto, o modelo 2 mostrou-se melhor para a operação dos reservatórios.

Deve-se sempre procurar a melhor regra de operação para cada reservatório da região nordeste brasileira, assim será possível otimizar a utilização do sistema, operando de forma eficiente na liberação de água em cada período de tempo ou, quando for preciso, armazenar e manter um certo volume de água no reservatório para que atenda a demanda no futuro. Sugere-se que outros modelos de curvas-guia sejam testados, bem como estudados os fatores que interferiram para que os reservatórios obtivessem diferentes resultados.

## 5 - REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. (2017). “Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação”, Anexo B, Piancó-Prianhas-Açu, Brasília-DF, 140 p.
- BRAVO, JM; COLLICHONN, W; PILAR, JV; TUCCI, CEM. (2008). “Otimização de regras de operação de reservatórios com incorporação da previsão de vazão”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.13(1), p. 181-196.
- CELESTE, B. A.; BILLIB, M.; CURI, F. W. (2010). “Regras operacionais de reservatório derivadas por um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo”. In anais do X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, Nov. 2010.
- CELESTE, B. A.; SANTANA, R. F.; SANTOS, W. M. (2016). “Otimização estocástica dinâmica e implícita para operação de reservatório: estudo de caso em sergipe”. Ciência e Natura, 2016, v. 38, p. 273-280.
- OLIVEIRA, I. A.; CELESTE B. A. (2016). “Operação de reservatórios sergipano via curvas-guia parametrizadas por modelo de simulação-otimização”. Scientia cum industria V. 4, N. 3, pp. 154 – 160.
- LANNA A. E. (2015). “Regularização de vazões em reservatórios”, in *Hidrologia: ciência e aplicação*. Org. Por Tucci, C. E. M. 4. ed. 7ª reimp. - Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015. 943 p.
- MCMAHON, T. A.; MEIN, R. G. (1978). “Reservoir Capacity and Yield”. Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier Scientific Publishing Company.
- REIS, L. G. (2002). “Avaliação de critérios de outorga associados a políticas de operação de reservatórios na bacia do rio Moxotó, semiárido brasileiro”. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado).
- VIEIRA, A. S.; SILVA, V. S.; CURI, W. F. (2010). “Escolha das Regras de Operação Racional para Subsistema de Reservatórios no Semiárido Nordestino”. Revista Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia. Vol. 7 nº1, jan/mar, Espírito Santo do Pinhal.