

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE

OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS PARA O CONTROLE DE CHEIAS: UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO CURVA VOLUME-DURAÇÃO AO RESERVATÓRIO DE PEDRA DO CAVALO

*Emanoella Rodrigues Ribeiro de Oliveira*¹; *Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade*²

RESUMO – Durante muitos anos, Cachoeira e São Félix, cidades do Recôncavo da Bahia, enfrentaram inundações do Rio Paraguaçu. Visando minimizar os danos provocados pelas cheias do rio e atender às demandas de abastecimento de água na Região Metropolitana de Salvador, foi construído o reservatório de Pedra do Cavalo. Os reservatórios para controle de cheias devem alocar espaços vazios, denominados de volume de espera, visando amortecer grandes picos de vazão. O presente trabalho objetivou estudar a operação do reservatório de Pedra do Cavalo com vistas na alocação de volumes de espera. A partir da série histórica de vazões naturais médias diárias, considerando o período de 1979 a 2014, admitidas restrições de defluências máximas para evitar inundações nas cidades, rodovias e pontes a jusante do reservatório, foi utilizado um modelo matemático para estimar volumes de espera, com base no método da Curva Volume-Duração. A estimativa dos volumes de espera apresentou resultados satisfatórios, dentro das determinações do atual plano de contingência para o controle de cheias. Conclui-se que as regras operacionais utilizadas no reservatório de Pedra do Cavalo estão adequadas ao amortecimento de uma cheia de 30 anos de recorrência, levando em conta a vazão de restrição de 1.500 m³/s.

ABSTRACT–For many years, Cachoeira and São Félix, cities of “Recôncavo da Bahia”, faced floods of Paraguaçu river. In order to minimize the damages caused by the floods of the river and to meet the demands of water supply in the Metropolitan Region of Salvador, the reservoir of Pedra do Cavalo was built. The reservoirs for flood control should allocate empty volumes, to dampen large flow peaks. The present research aimed to study the operation of Pedra do Cavalo reservoir with views to the allocation of empty volumes. From the historical series of natural average daily flows, considering the period from 1979 to 2014 and allowing maximum defluence restrictions to avoid flooding in cities, highways and bridges downstream of the reservoir, a mathematical model was used to estimate waiting volumes, based on the Method of Curve Volume X Duration. The estimates of the empty volumes presented satisfactory results, within the limits of the current flood control contingency plan. Therefore that the operational rules used in Pedra do Cavalo reservoir are suitable to the damping of a full 30 years of recurrence, taking into account the restriction flow of 1,500 m³/s.

Palavras-Chave – Reservatório. Controle de cheias. Volume de espera.

1) CETEC/Universidade Federal do Recôncavo da Bahia: Rua Rui Barbosa, nº 710, Centro, Cruz das Almas-BA, CEP 44380-000, (74) 9 9114 5073, emanoella.rodrigues@outlook.com

2) CETEC/Universidade Federal do Recôncavo da Bahia: Rua Rui Barbosa, nº 710, Centro, Cruz das Almas-BA, CEP 44380-000, (75) 3621-9362, prserrano@yahoo.com.br

1 – INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, os municípios de Cachoeira e São Félix, localizados às margens do Rio Paraguaçu, sofreram com inundações destruidoras devido às cheias nas porções mais altas do rio e seus afluentes (SILVA, 2016). As enchentes representavam grandes transtornos para a população, causando desalojamento de famílias, interrupção das atividades econômicas e da circulação do trem.

O trimestre mais chuvoso na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu varia com a sua extensão, sofrendo atraso à medida que se aproxima da sua foz. Nos trechos médio e alto do rio, as maiores chuvas ocorrem de novembro a janeiro, enquanto, no litoral, as maiores precipitações são registradas entre maio e julho. As grandes cheias no rio Paraguaçu, que afetavam as cidades de São Félix e Cachoeira, foram registradas principalmente nos meses de novembro a março, nos quais se registram baixos índices pluviométricos nesta área. Isto sugere que as cheias nessa região são consequências de chuvas acumuladas e vazões geradas na bacia hidrográfica provenientes dos trechos médio e alto do rio (MESTRINHO, 1998).

No ano de 1970, iniciou-se a construção da barragem de Pedra do Cavalo, cujo reservatório é de múltiplos usos, entre eles o controle de cheias. O reservatório Pedra do Cavalo desempenha importante papel na minimização de ocorrências de enchentes a jusante. No entanto, segundo o MMA (2006), em 1989 o reservatório não foi capaz de alocar o volume de água proveniente das ondas de cheias, o que provocou uma grande enchente em São Félix e Cachoeira. Para evitar que situações como essa ocorram é necessário estudar a operação do reservatório, estimando adequados valores para o volume de espera do reservatório.

O volume de espera, também chamado de volume para o controle de cheias, é o volume de água situado entre o volume útil e o nível de água máximo do reservatório, e tem como finalidade o amortecimento de ondas de cheias, visando à minimização de prejuízos ocasionados por inundações a jusante da barragem. De acordo com Kelman (1987), o desafio da operação de reservatórios para o controle de cheias é determinar o volume de espera capaz de garantir que a máxima vazão defluente seja menor ou igual à vazão de restrição.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a alocação de volumes de espera no reservatório Pedra do Cavalo, localizado rio Paraguaçu, no Estado da Bahia, considerando a proteção e controle de cheias a jusante.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Reservatório de Pedra do Cavalo está localizado na parte baixa da Bacia do Rio Paraguaçu, nas coordenadas Latitude 12° 35' 12'' Sul e Longitude 38°59' 55'' Oeste., abrangendo os municípios de Governador Mangabeira e Conceição da Feira, e distanciando-se aproximadamente 2 km das sedes dos municípios de São Félix e Cachoeira e 140 km da capital do estado, Salvador. A construção da barragem

foi iniciada na década de 1970 pela extinta Companhia de Desenvolvimento do Vale do Parauçu – DESENVALE e foi concluída no ano de 1985 (ANDRADE, 2006).

O reservatório foi projetado para múltiplos usos. No entanto, até 2005, os principais usos da água eram o abastecimento humano e o controle de enchentes nas cidades de Cachoeira e São Félix. Até então a barragem era operada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento - EMBASA. Em 2005, o reservatório passou a atuar também na geração de energia hidrelétrica e passou a ser gerenciado pela Votorantim (GENZ, 2006; ANDRADE, 2006).

A tabela 1 apresenta alguns elementos básicos para a operação do reservatório, com base na relação Cota-Volume de Pedra do Cavalo.

Tabela 1: Elementos operacionais do reservatório Pedra do Cavalo

| Elemento | Cota (m) | Volume (hm ³) |
|--|----------|---------------------------|
| Cota da soleira do vertedouro | 106,00 | 2.765,54 |
| NA mínimo para operação das turbinas hidrelétricas | 113,00 | 3.595,34 |
| NA máximo normal operativo | 120,00 | 4.630,96 |
| NA máximo maximorum | 124,00 | 5.329,88 |
| Crista da barragem | 125,50 | 5.615,54 |

Fonte: Próprio autor (Adaptado de EMBASA)

De acordo com a RTK Engenharia (2004), são considerados quatro períodos hidrológicos para os estudos das vazões afluentes e operação do reservatório, período seco (maio-outubro), mês de transição do período seco para o chuvoso (novembro), período chuvoso (dezembro - março) e mês de transição do período chuvoso para o seco (abril). Os dados de vazões diárias para diferentes tempos de recorrência e períodos hidrológicos para o reservatório encontram-se na tabela 2.

Tabela 2: Cheias para os diferentes tempos de recorrência

| Tempo de recorrência (anos) | Vazão Média Diária (m ³ /s) | | |
|-----------------------------|--|----------|-------|
| | Dezembro a Março | Novembro | Abril |
| 10 | 2.703 | 1023 | 906 |
| 30 | 3.959 | 1514 | 1339 |
| 50 | 4.543 | 1742 | 1540 |
| 100 | 5.335 | 2052 | 1813 |
| 1000 | 7.967 | 3081 | 2720 |

Fonte: RTK Engenharia, 2004.

Sabe-se que não é possível operar o reservatório com garantia de proteção contra todas as cheias que podem ocorrer no Rio Paraguaçu. Dessa forma, é imposto um limite de proteção pela própria segurança da barragem, que equivale à cheia com 30 anos de recorrência (RTK Engenharia, 2004). De acordo com a tabela 2, esse valor corresponde a 3.959 m³/s.

As regras de operação para o controle de cheias do reservatório Pedra do Cavalo foram planejadas considerando os períodos chuvoso, seco e de transição. A partir disso, são definidas as restrições de montante e jusante da barragem, ilustradas na figura 1.

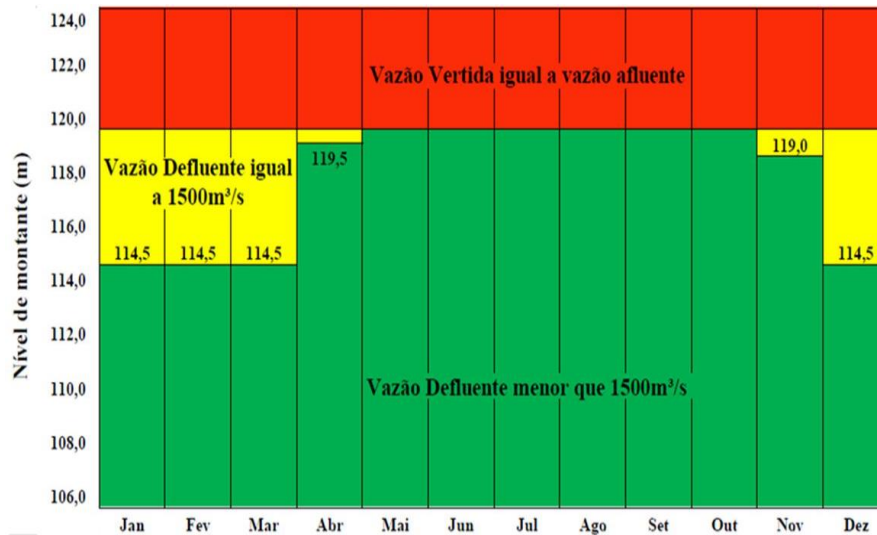


Figura 1: Restrições de operação do Reservatório pedra do Cavalo

(Fonte: Adaptado de ONS, 2016)

3 - METODOLOGIA

Os dados hidrológicos utilizados são dados de vazões médias diárias afluentes ao reservatório, processadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, e fornecidos pela equipe da Votorantim Energia, que gerencia a Usina Hidrelétrica (UHE) de Pedra do Cavalo. Foi utilizada uma série histórica que compreende os anos de 1979 a 2014.

A estimativa do volume de espera do reservatório foi realizada através do Método Curva Volume-Duração (MCVD). O método relaciona o intervalo de tempo com a duração de dias (d) consecutivos com o máximo volume afluente neste período (CASTRO, 2003). O volume afluente é definido pela equação 1.

$$va(d) = \max_{(0 < t < h - d + 1)} \left[\sum_{j=0}^{d-1} (q(t+j) \times \Delta t) \right] \quad (1)$$

Onde: $va(d)$ = máximo volume afluente para a duração de d dias;

d = duração em dias;

q (t + j) = vazão média diária no dia (t + j);

Δt = intervalo de discretização do tempo em segundos;

h = número de dias da estação chuvosa

t = tempo em dias.

De acordo com a série histórica de vazões médias diárias é possível definir o volume de espera para amortecimento de cheias, para o período chuvoso de cada ano hidrológico.. Deve-se ainda definir uma descarga de restrição que não cause danos a jusante. Dessa forma, utiliza-se a equação 2 para obter o volume de espera.

$$ve(i) = \max [(va(d) - d \cdot Qr \cdot \Delta t), d = 1,2,3, \dots, h] \quad (2)$$

Onde: $ve(i)$ = volume de espera para o período chuvoso do ano hidrológico;
 Qr = descarga de restrição
 d = duração crítica

A metodologia foi aplicada a partir de uma adequação do algoritmo MCVD1 – Método da Curva Volume-Duração Determinístico utilizada por Rolim e Souza Filho (2017) em MATLAB, sendo disponibilizado para o presente estudo pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

A estimativa do volume de espera pelo MCVD foi realizada para a série histórica de 1979-2014. Posteriormente, foram selecionados os anos que apresentaram afluências maiores que a vazão de restrição para aplicação do método.

Buscando uma variação do volume de espera de acordo com o mês do ano hidrológico, tentou-se uma modificação do Método Curva Volume-Duração, se assemelhando ao MCVD por janelas. De acordo com Castro (2003), o Método Curva Volume-Duração por janelas consiste na divisão da série histórica de vazões diárias em “janelas”, ou seja, em blocos que se deslocam gradativamente ao longo da época chuvosa. Dessa forma, para cada ano hidrológico, aplicou-se o método, individualmente, para os meses que compreendem o período chuvoso e os períodos de transição. A partir dos resultados, foi escolhido o máximo volume de espera para cada mês.

Devido às dificuldades encontradas, inicialmente, na obtenção do modelo para o cálculo do volume de espera, não foi possível realizar um estudo probabilístico. Considerou-se uma série de dados com sazonalidade determinística. Dessa forma, supõe-se que o comportamento do reservatório Pedra do Cavalo pode ser previsto a partir de dados anteriores, no entanto, sabe-se que isso não ocorre de fato. Sendo assim, a estimativa realizada não tem como objetivo determinar volumes de espera ótimos para o reservatório, mas serve como um estudo complementar para a análise das regras do plano de contingência atualmente praticado para controle de cheias em Pedra do Cavalo.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a análise da série histórica de vazões estudadas, a tabela 3 apresenta a máxima vazão diária de cada mês, nos anos em que ocorreram vazões afluentes superiores à vazão de restrição.

Tabela 3: Máximas vazões diárias dos meses de 1979-2014

| ANO | MÁXIMA VAZÃO DIÁRIA (M ³ /S) | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | OUT | NOV | DEZ | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET |
| 1979/1980 | 67 | 144 | 157 | 443 | 4494 | 762 | 88 | 87 | 90 | 67 | 76 | 47 |
| 1980/1981 | 52 | 71 | 454 | 89 | 71 | 2404 | 1294 | 226 | 200 | 84 | 51 | 34 |
| 1985/1986 | 121 | 569 | 2651 | 330 | 57 | 39 | 35 | 77 | 30 | 30 | 30 | 55 |
| 1989/1990 | 124 | 233 | 5198 | 1310 | 173 | 83 | 25 | 18 | 20 | 23 | 21 | 34 |
| 1991/1992 | 10 | 1119 | 601 | 2877 | 2850 | 250 | 100 | 47 | 93 | 101 | 63 | 34 |
| 1996/1997 | 87 | 314 | 272 | 265 | 392 | 2106 | 1203 | 436 | 80 | 69 | 31 | 17 |
| 2001/2002 | 151 | 57 | 268 | 1524 | 964 | 88 | 46 | 88 | 57 | 80 | 114 | 81 |
| 2003/2004 | 23 | 100 | 10 | 3367 | 442 | 540 | 231 | 67 | 45 | 63 | 18 | 5 |

Fonte: Próprio autor (Adaptado de ONS, 2016)

Sabe-se que o volume de espera tem como objetivo laminar as cheias, ou seja, amortecer as vazões maiores que as vazões de restrição, evitando danos a jusante da barragem. Dessa forma, o volume de espera adequado garante que a vazão defluente não seja maior que a vazão de restrição. Foram constatados nove eventos em que a vazão afluente superou a vazão de restrição (1.500 m³/s), caso essas vazões naturais (afluentes) fossem liberadas diretamente a jusante, causariam transtornos à população de Cachoeira e São Félix, e de fato, isso ocorreu, frequentemente, anterior à construção da barragem.

Os maiores picos de vazão aconteceram nos meses de dezembro a fevereiro. A cheia de dezembro de 1989 destaca-se entre as demais, com uma afluência de 5.184 m³/s. Vale ressaltar que a mesma é reconhecida pela população das cidades de Cachoeira e São Félix como a inundação que provocou maiores prejuízos material.

Utilizando a série histórica 1979-2014, através do Método da Curva Volume-Duração, estimou-se o volume de espera do reservatório Pedra do Cavalo em 1.718,33 hm³. A figura 2 apresenta a Curva Volume-Duração encontrada para a série histórica estudada.

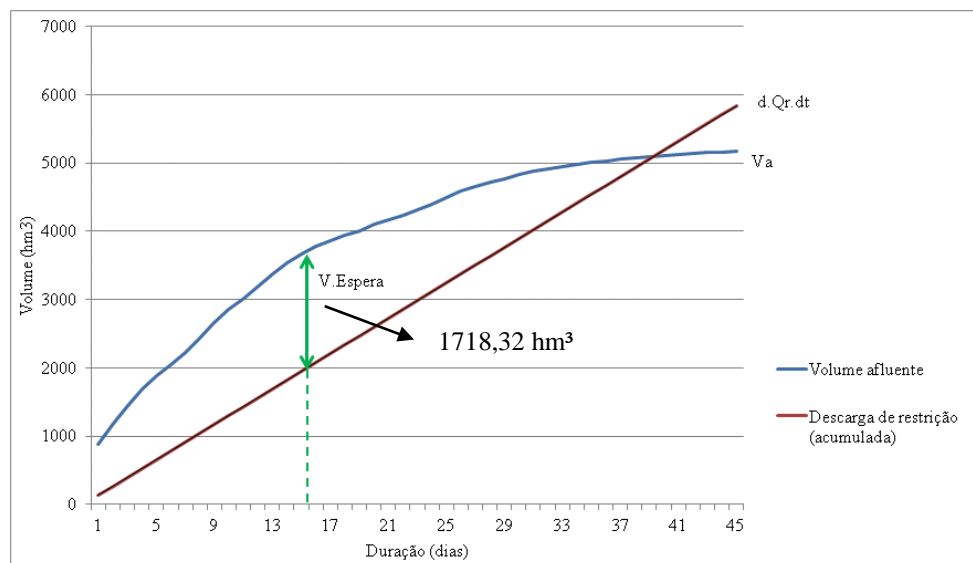


Figura 2: Curva Volume-Duração para o reservatório Pedra do Cavalo (1979-2014)

(Fonte: Próprio autor)

Como mostra a equação 2, o volume de espera é o valor máximo da diferença entre o volume afluente e a vazão de restrição acumulada ao longo da duração de dias. Dessa forma, o volume de espera está compreendido entre as duas curvas.

Foram ainda selecionados os anos com maiores vazões de afluência para a realização da estimativa do volume de espera. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.

Tabela 4: Volumes de espera pelo método da Curva Volume-Duração

| Ano hidrológico (out – set) | Volume de espera (hm ³) | Ano hidrológico (out-set) | Volume de espera (hm ³) |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1979 – 1980 | 1.236,30 | 1991 – 1992 | 1324,08 |
| 1980 – 1981 | 497,23 | 1996 – 1997 | 274,75 |
| 1985 – 1986 | 463,62 | 2003 – 2004 | 435,20 |
| 1989 – 1990 | 1718,32 | 1979 – 2014 | 1.718,32 |

Fonte: Próprio autor

Observa-se que o volume de espera estimado possui valores mais elevados nos períodos de 1979-1980, 1989-1990 e 1991-1992. Os resultados são coerentes com as altas vazões afluentes ao reservatório ocorridas nesses períodos, sendo o volume de espera mais significativo em 1989-1990, devido à grande cheia constatada em dezembro de 1989, que apresentou uma vazão muito superior à vazão com tempo de recorrência de 30 anos, para a qual o reservatório foi projetado.

Os resultados obtidos para as estimativas do volume de espera realizadas nos meses de novembro a abril encontram-se na tabela 5. Observando os volumes de espera de cada mês nos diferentes anos hidrológicos, foi escolhido o volume de espera máximo para cada um dos meses.

Tabela 5: Volumes de espera máximos estimados por mês (série histórica 1979-2014)

| Mês | Volume de espera (hm ³) | Ano hidrológico da estimativa |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Novembro | 46,83 | 1991-1992 |
| Dezembro | 1.718,32 | 1989-1990 |
| Janeiro | 435,20 | 2003-2004 |
| Fevereiro | 1.236,30 | 1979-1980 |
| Março | 497,23 | 1980-1981 |
| Abril | 90,72 | 1980-1981 |

Fonte: Próprio autor

Os maiores volumes de espera encontrados estão nos meses de dezembro e fevereiro. Os volumes de espera para os meses de novembro e abril possuem valores bem abaixo dos demais, isso porque os mesmos representam meses de transição, e não período chuvoso.

A tabela 6 apresenta as cotas (apresentadas no plano de contingência) e os volumes de espera no reservatório (calculados a partir da relação cota-volume) para os meses de novembro a abril.

Tabela 6: Volumes de espera pelo atual plano de contingência

| Mês | Cota meta (m) | Volume de espera até a cota 124m (hm ³) |
|------------------|---------------|---|
| Novembro | 119,0 | 860,03 |
| Dezembro a Março | 114,5 | 1.530,78 |
| Abril | 119,5 | 780,03 |

Fonte: Próprio autor

Para a maioria dos anos hidrológicos nos quais foi aplicado o Método da Curva Volume-Duração, o reservatório seria capaz de amortecer as cheias. Dessa forma, é possível perceber que os volumes de espera encontrados pelo método estão abaixo do valor definido pelo atual plano de contingência para o controle de cheias para o período chuvoso, exceto para o ano de 1989-1990.

Para o período de 1989-1990, no qual o volume de espera estimado (1.718,32 hm³/s) foi muito maior que o volume de espera atual definido para o período chuvoso (1.530,78 hm³/s), o que explica as inundações que atingiram os municípios de Cachoeira e São Félix no ano de 1989. É importante ressaltar que em dezembro de 1989, ocorreram vazões superiores ao pico de cheia com recorrência de 30 anos, para a qual o reservatório está sendo operado.

De acordo com as regras de operação do reservatório Pedra do Cavalo (figura 1), quando o nível da água atingir a cota 120 m, a vazão defluente será igual à vazão afluente, podendo, inclusive, ser maior que a vazão de restrição. Dessa forma, a figura 3 apresenta uma comparação entre os volumes de espera estimados pelo MCVD com os volumes de espera até as cotas 120m (NA máximo normal) e 124m (NA máximo maximorum).

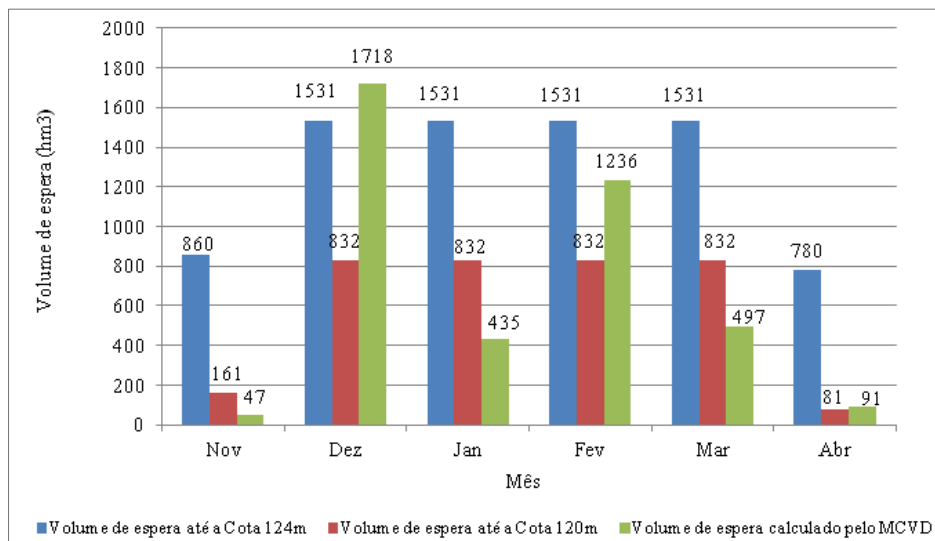


Figura 3: Comparação entre os dados de volume de espera

(Fonte: Próprio autor)

Observa-se que nos meses de fevereiro e abril, o volume de espera supera a cota 120m, mas encontra-se abaixo do NA máximo maximorum, dessa forma, deve-se ajustar uma vazão defluente igual a vazão afluyente até que o nível de água retorne a cota 120m e posteriormente igual a $1.500\text{m}^3/\text{s}$ até retornar ao nível de água meta. O mês de dezembro, por sua vez, apresenta um volume de espera calculado maior que o volume de espera do atual plano de contingência, isso acontece, porque esse cálculo considerou as maiores afluências, que ocorreram em dezembro de 1989. Ressalta-se que a comparação foi realizada com valores obtidos no método determinístico, impondo uma limitação ao estudo. A análise probabilística, certamente, ofereceria resultados mais satisfatórios quando se tratam dos altos valores encontrados para o volume de espera, visto que associaria o risco do reservatório ao método, reduzindo o valor encontrado de $1.718,33\text{hm}^3$.

5 - CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou maior aprofundamento sobre a operação do reservatório de Pedra Do Cavallo, com vistas ao controle de cheias. Realizou-se um estudo das características hidrológicas do reservatório, considerando vazões afluentes ao reservatório. Foi possível realizar uma análise comparativa entre as regras de operação do atual plano de contingência para o controle de cheias em Pedra do Cavallo e a estimativa do volume de espera do reservatório pelo método da curva Volume-Duração (MCVD) considerando uma série histórica de 35 anos.

A estimativa dos volumes de espera pelo MCVD1 apresentou resultados dentro do limite do atual plano de contingência para o controle de cheias. Com uma exceção para o ano hidrológico de 1989-1990, o qual apresentou vazões afluentes com tempo de recorrência de mais de 50 anos. Os

volumes de espera estimados, no entanto, não foram submetidos à uma avaliação probabilística, o que implica em limitações aos resultados alcançados, o que se reconhece.

Reconhecendo as limitações na metodologia e resultados obtidos, recomenda-se a utilização do método considerando a sazonalidade probabilística, visto que o método determinístico não se encaixa adequadamente aos estudos de vazões, por não ser possível garantir que os eventos passados ocorram no futuro.

6 - REFERÊNCIAS

ANDRADE, P. R. G. S de (2006). **Simulação da operação do reservatório de Pedra do Cavalo – BA, para múltiplos usos, considerando-se níveis de alerta: contribuições para o balizamento do termo de permissão de uso e operação do aproveitamento hidrelétrico.** In: VIII Simpósio De Recursos Hídricos do Nordeste, Out. 2006, Gravatá – PE.

CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2016). **Annual Disaster Statistical Review 2016: The numbers and trends.** Université Catholique de Louvain: Brussels, Belgium.

GENZ, F (2006). **Avaliação dos Efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape.** 167f. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

KELMAN, J (1987). **Cheias e Aproveitamentos Hidrelétricos.** ABRH Rio de Janeiro-RJ, 175 p.

MESTRINHO, S. S. P (1998). **Estudo do comportamento geoquímico dos metais pesados nos sedimentos da região estuarina do Rio Paraguaçu – Bahia.** 158f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo, São Paulo.

MMA, Ministério do Meio Ambiente (2006). **Caderno da região hidrográfica Atlântico Leste – Secretaria de Recursos Hídricos.** MMA Brasília, 156 p.

ROLIM, L. Z. R.; SOUZA FILHO, F. A. de. **Definição da Cota para nível de alerta - Operação do reservatório Castanhão para o Controle de Cheia.** – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

RTK ENGENHARIA (2004). Relatório: **Regras de Operação Pedra do Cavalo.**

SILVA, A. A. R (2016). **Formação Territorial de Cachoeira e São Félix – BA: A Geomorfologia como Processo Condicionante.** In: V Simpósio Cidades Médias e Pequenas da Bahia, Jun. 2016, Ilhéus – BA.