



**Universidade Federal de Campina Grande**

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

Curso de Engenharia Civil

**Determinação de níveis de alerta para operação de reservatórios  
isolados no semiárido: o caso do Açude Epitácio Pessoa**

**Sérgio Torres de M. Costa Agra**

Orientador: Prof. Carlos de Oliveira Galvão

Campina Grande

Outubro de 2020

SÉRGIO TORRES DE M. COSTA AGRA

Determinação de níveis de alerta para operação de reservatórios isolados no semiárido: o caso do Açude Epitácio Pessoa

**Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Campina Grande, como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia civil**

Campina Grande, outubro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

SÉRGIO TORRES DE M. COSTA AGRA

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia civil, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

---

Orientador: Dr. Carlos de Oliveira Galvão  
Universidade Federal de Campina Grande -  
UFCG

---

Dr. Janiro Costa Rêgo  
Universidade Federal de Campina Grande -  
UFCG

---

Me. Tereza Helena Costa Nunes  
Universidade Federal de Campina Grande -  
UFCG

Campina Grande, 29 de outubro de 2020



# Agradecimentos

Agradeço, acima de tudo, aos meus pais, Aroldo e Marisa, e ao meu irmão, Armando. Por todo amor, inspiração e suporte dado em todos os momentos da minha vida. Amo vocês incondicionalmente e eternamente.

À todos os familiares e amigos próximos que contribuíram com meu crescimento pessoal e me apoiaram até aqui.

Ao Prof. Carlos de Oliveira Galvão, por todo conhecimento passado no curso de Engenharia civil e aos demais membros da banca, Prof. Janiro e Profa. Tereza.

Aos demais amigos e professores que a Universidade Federal de Campina Grande me deu o privilégio de conhecer, obter valioso conhecimento e ter como companhia durante essa caminhada.

*A Alaíde (in memoriam) e Djanira (in memoriam), dedico.*



*Sou filho da resistência  
Sou de uma terra de bravos  
Sou o mel doce dos favos  
Meu nome é resiliência  
Tenho muita paciência  
e não me deixo abater  
Eu só quero o bem querer  
esse é o meu destino  
Quanto mais sou nordestino  
Mais tenho orgulho de ser*

*Aguento a seca e a fome  
e bebo água barrenta  
A minha vida é sedenta  
pela justiça do homem  
Eu não tenho sobrenome  
Eu sou o alvorecer,  
o luar do anoitecer  
e nunca me desanimo  
Quanto mais sou nordestino  
Mais tenho orgulho de ser*

*Aroldo Agra*





# Resumo

Reservatórios construídos em regiões de clima tipicamente semiárido e de baixa média de precipitações anuais estão susceptíveis à uma variabilidade interanual rápida e prejudicial do seu volume, o que influencia diretamente na quantidade e qualidade de água disponível para a população abastecida por este. É por este mote que o presente trabalho teve como seu objetivo analisar diversos cenários de operação, através de níveis de alerta, que são parâmetros de controle do volume do reservatório e coeficientes de demanda, que reduzem a vazão retirada para cada nível de alerta atingido. O reservatório em estudo é o Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), localizado na Paraíba e devido a variabilidade de sua recarga anual, o reservatório urge por medidas eficientes de operação. Induzido pelas características da região, como o clima, as precipitações e perdas por evaporação além de informações de agências de água, foram propostas cinco políticas de operação. Através de abordagens de simulação com séries históricas de precipitações e balanço hídrico, obteve-se resultados numéricos destas simulações, sendo analisadas por critérios de performance. Os resultados apontam que cenários de maior confiabilidade nem sempre são os ideais, podendo apresentar menor resiliência e maior vulnerabilidade, o que implica na não existência de uma política ideal, e que qualquer tomada de decisão dos gestores do reservatório deverá ser respaldada por mais fatores além de apenas indicadores numéricos.

**Palavras-chave:** Operação de reservatórios, simulação, açude Epitácio Pessoa.



# Abstract

Reservoirs built in regions with a typically semi-arid climate and low average annual rainfall are susceptible to rapid and damaging interannual variability in their volume, which directly influences the quantity and quality of water available to the population supplied by it. For this reason that the present work aimed to analyze different operating scenarios, through alert levels, which are parameters for controlling the volume of the reservoir and demand coefficients, which reduce the outflow for each alert level reached. The reservoir under study is the Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), located in Paraíba and due to the variability of its annual recharge, the reservoir demands for efficient operation measures. Induced by the characteristics of the region, such as climate, rainfall and evaporation losses, in addition to information from water agencies, five operating policies have been proposed. Through simulation approaches with historical series of precipitation and water balance, numerical results of these simulations were obtained, being analyzed by performance criteria. The results indicate that scenarios of greater reliability are not always ideal, and may present less resilience and greater vulnerability, which implies that there is no ideal policy, and that any decision making by the reservoir managers must be supported by more factors than only numerical indicators.

**Keywords:** Reservoir operation, simulation, Epitácio Pessoa reservoir.



# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Açude Boqueirão - PB . . . . .  | 22 |
| Figura 2 – Conexões entre gerenciamento e gestão de recursos hídricos. . . . .             | 26 |
| Figura 3 – Bacias Hidrográficas do estado da Paraíba. . . . .                              | 27 |
| Figura 4 – Açude para regularização de vazões. . . . .                                     | 29 |
| Figura 5 – Entradas e saídas de água em um reservatório. . . . .                           | 30 |
| Figura 6 – Balanço quali-quantitativo na região do Açude de Boqueirão. . . . .             | 31 |
| Figura 7 – Algoritmo de aplicação da DP. . . . .   | 35 |
| Figura 8 – Situação e localização do Açude de Boqueirão. . . . .                           | 38 |
| Figura 9 – Variação no volume percentual armazenado, entre os anos de 2010 e 2019. . . . . | 38 |
| Figura 10 – Série histórica de precipitações de 41 anos, entre 1963 e 2003 . . . . .       | 41 |
| Figura 11 – Níveis de Alerta para Cenário I . . . . .                                      | 43 |
| Figura 12 – Níveis de Alerta para Cenário II . . . . .                                     | 44 |
| Figura 13 – Níveis de Alerta para Cenário III . . . . .                                    | 44 |
| Figura 14 – Níveis de Alerta para Cenário IV . . . . .                                     | 45 |
| Figura 15 – Níveis de Alerta para Cenário V . . . . .                                      | 45 |
| Figura 16 – Resumo das configurações de simulação dos cenários . . . . .                   | 46 |
| Figura 17 – Resultado da simulação para Cenário I . . . . .                                | 47 |
| Figura 18 – Resultado da simulação para Cenário II . . . . .                               | 49 |
| Figura 19 – Resultado da simulação para Cenário III . . . . .                              | 50 |
| Figura 20 – Resultado da simulação para Cenário IV . . . . .                               | 51 |
| Figura 21 – Resultado da simulação para Cenário V . . . . .                                | 53 |



# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Pontos da curva e seus respectivos valores de cota, área e volume. . . . | 40 |
| Tabela 2 – Configurações de simulação do cenário I . . . . .                        | 47 |
| Tabela 3 – Configurações de simulação do cenário II . . . . .                       | 49 |
| Tabela 4 – Configurações de simulação do cenário III . . . . .                      | 50 |
| Tabela 5 – Configurações de simulação do cenário IV . . . . .                       | 51 |
| Tabela 6 – Configurações de simulação do cenário V . . . . .                        | 53 |
| Tabela 7 – Confiabilidades para cada cenário simulado. . . . .                      | 55 |
| Tabela 8 – Resiliências para cada cenário simulado. . . . .                         | 55 |
| Tabela 9 – Vulnerabilidades para cada cenário simulado. . . . .                     | 55 |
| Tabela 10 – Volumes mínimos dos cenários em 30 meses de gerenciamento. . . . .      | 56 |
| Tabela 11 – Resumo de todos os indicadores avaliativos dos cenários. . . . .        | 56 |





# Lista de abreviaturas e siglas

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

ANA - Agência Nacional de Águas

CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

DP - Programação Dinâmica

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MCM - Milhões de metros cúbicos

PERH-PB - Política Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

SDP - Programação Dinâmica Estocástica



# Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>21</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Problemática</b>                                       | <b>21</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos</b>  | <b>23</b> |
| 1.2.1      | Objetivo Geral  | 23        |
| 1.2.2      | Objetivos Específicos                                     | 23        |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                | <b>25</b> |
| <b>2.1</b> | <b>A gestão de recursos hídricos</b>                      | <b>25</b> |
| 2.1.1      | Desafios no planejamento e gerenciamento                  | 25        |
| 2.1.2      | Gestão de recursos hídricos na Paraíba                    | 26        |
| <b>2.2</b> | <b>Regularização de vazão e vazão outorgável</b>          | <b>28</b> |
| <b>2.3</b> | <b>O balanço hídrico</b>                                  | <b>30</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Operação de reservatórios por simulação</b>            | <b>32</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Medidas de performance do sistema</b>                  | <b>33</b> |
| 2.5.1      | Confiabilidade  | 33        |
| 2.5.2      | Resiliência   | 34        |
| 2.5.3      | Vulnerabilidade   | 34        |
| <b>2.6</b> | <b>Programação dinâmica</b>                               | <b>34</b> |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA</b>  | <b>37</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Definição da área de estudo</b>                        | <b>37</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Parâmetros de entrada para a simulação de cenários</b> | <b>39</b> |
| 3.2.1      | Vazões demandadas, vazões afluentes e lâmina evaporada    | 39        |
| 3.2.2      | Curva cota-área-volume                                    | 40        |
| 3.2.3      | Série histórica de precipitações                          | 41        |
| <b>3.3</b> | <b>Cenários de simulação</b>                              | <b>42</b> |
| 3.3.1      | Cenário I   | 43        |
| 3.3.2      | Cenário II  | 43        |
| 3.3.3      | Cenário III   | 43        |
| 3.3.4      | Cenário IV  | 44        |
| 3.3.5      | Cenário V   | 45        |
| 3.3.6      | Resumo dos cenários simulados                             | 46        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS</b>   | <b>47</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Resultados das simulações</b>                          | <b>47</b> |
| 4.1.1      | Cenário I   | 47        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4.1.2      | Cenário II . . . . .   | 49        |
| 4.1.3      | Cenário III . . . . .  | 50        |
| 4.1.4      | Cenário IV . . . . .   | 51        |
| 4.1.5      | Cenário V . . . . .  | 53        |
| <b>4.2</b> | <b>Análise dos resultados via critérios de performance . . . . .</b> | <b>55</b> |
| 4.2.1      | Confiabilidade . . . . .   | 55        |
| 4.2.2      | Resiliência . . . . .  | 55        |
| 4.2.3      | Vulnerabilidade . . . . .  | 55        |
| 4.2.4      | Volumes mínimos . . . . .  | 56        |
| 4.2.5      | Resumo dos indicadores dos cenários . . . . .                        | 56        |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO . . . . .</b>   | <b>59</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>   | <b>61</b> |

# 1 Introdução

A água doce é um recurso de fundamental importância para diversos usos na vida humana, incluindo uso doméstico, industrial, irrigação e geração de energia. Um gerenciamento efetivo dos recursos hídricos é necessário para garantir, em quase a totalidade do tempo, estes usos de água. Como as águas superficiais - a exemplo da água de rios - são recursos hídricos importantes em todas as regiões, os reservatórios, que moderam a variação normal no escoamento de rios por armazenar água, têm uma importante função no gerenciamento de recursos hídricos. Portanto, uma operação mais precisa dos sistemas de reservatórios é importante para estabelecer um melhor e mais efetivo gerenciamento dos recursos hídricos (NOHARA, 2018).

As obras de engenharia responsáveis por reter grandes quantidades de água doce, para armazenamento e consumo posterior, são denominadas reservatórios. Estas estruturas são utilizadas em redes de abastecimento de água de zonas residenciais, agrícolas ou industriais, para produção de energia elétrica ou mesmo regularização das vazões de um corpo hídrico, evitando que haja alagamentos a jusante do mesmo. Uma rede de abastecimento de água pode ser classificada como um sistema composto por algumas partes, dentre elas: a bacia de captação de água, um reservatório de água não tratada, a adução da água bruta deste reservatório para uma estação de tratamento, e, por fim, a distribuição deste reservatório até os consumidores da água, esta distribuição devendo ser planejada e gerenciada.

Para maior compreensão da necessidade do gerenciamento e planejamento de recursos hídricos, principalmente numa região fortemente afetada pela estiagem, Loucks (2017) enfatiza que as atividades de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos são motivadas pela percepção de que existem conflitos a serem resolvidos para se obter maiores benefícios, alterando o gerenciamento e o uso da água, havendo a necessidade de cuidadoso estudo e pesquisa, bem como o envolvimento total das partes interessadas na busca do melhor plano de compromisso ou política de gerenciamento.

## 1.1 Problemática

No reservatório Boqueirão (Figura 1), localizado no Cariri da Paraíba, predomina um clima tipicamente semiárido, caracterizado pela baixa ocorrência de chuvas e por uma quantidade de luz solar superior a 2 mil e 800 horas anuais (Projeto Unicampo, 2005). Devido à estes fatores climáticos, há pequena recarga de água no reservatório por precipitações sazonais, ainda sofrendo com evaporação devido ao espelho d'água.

Figura 1 – Açude Boqueirão - PB



De acordo com Nunes (2015), a utilização da água de Boqueirão tem gerado conflitos, pois os usuários reivindicam vazões muito além da vazão outorgável do reservatório. O clima e, sobretudo, a falta de uma gestão de recursos hídricos eficiente, já ocasionou baixas no volume do reservatório, até se aproximar do volume morto, entre 1998 e 2003 e, novamente, em 2012, em um ciclo de anos secos, com o volume armazenado chegando a 2,9% da capacidade total, seu pior nível da história. O colapso hídrico da região foi evitado em abril de 2017, com a chegada das águas da transposição do Rio São Francisco.

Neste trabalho, inicialmente, serão descritos os procedimentos de operação em tempo real de reservatórios, aplicados ao Açude Boqueirão, utilizando dados históricos para a gestão de recursos hídricos em reservatórios. Será investigado a aplicabilidade de um modelo de operação para o gerenciamento de secas, e como a operação de um reservatório pode ser otimizada utilizando abordagens de simulação, considerando a natureza estocástica do regime hidrológico, podendo apresentar, então, uma política de operação que minimize os danos causados pela seca, analisada em dados mensais. Por fim, serão apresentados os resultados das operações por diversas abordagens e estas serão analisadas via medidas de performance.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Propor a aplicação de um modelo de operação baseado em previsões em níveis de alerta, no açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), da bacia localizada na Região do Alto Curso do Rio Paraíba.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Investigar como pode ser realizada a operação de um reservatório em diferentes cenários;
- Confeccionar diversos cenários de política de operação de um reservatório, através de níveis de alerta e alteração na oferta hídrica;
- Analisar os resultados da operação para diversos cenários, sob determinados critérios;
- Propor, através das análises dos cenários, mudanças na política de operação deste reservatório buscando uma operação mais controlada e que atenda a população na maior parte do tempo.





## 2 Referencial Teórico

### 2.1 A gestão de recursos hídricos

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos se dá, sobretudo, através da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, cujo caráter é de descentralizar as decisões acerca dos recursos hídricos. Os comitês de bacias hidrográficas são instâncias participativas, reunindo os poderes públicos nas três instâncias com os usuários de água e a sociedade civil organizada. A lei da PNRH criou condições para identificação, mitigação ou eliminação dos conflitos pelo uso das águas, através dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas, e arbitrar conflitos no âmbito administrativo.

#### 2.1.1 Desafios no planejamento e gerenciamento

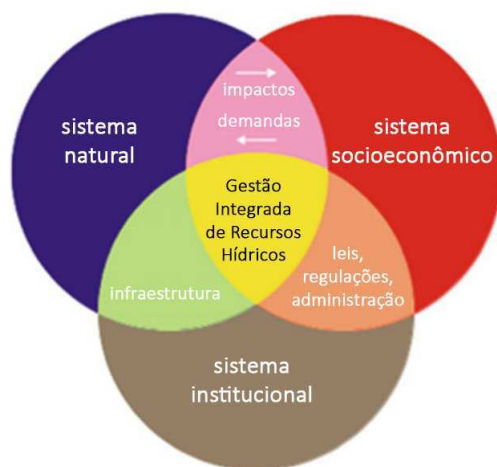
O planejamento e a gestão de recursos hídricos devem ser fundamentados em teorias e modelos, além de uma administração eficiente de programas públicos e participação das partes interessadas. As ciências naturais e sociais ajudam a prever, com certa imprecisão (devido a falta de integração entre as ciências), alguns dos impactos econômicos, ambientais e ecológicos das decisões tomadas por gestores, e é por este motivo que se faz necessária a participação e contribuição de todas as partes interessadas (Loucks, 2017).

Através da parceria em diversos campos do conhecimento, pode-se alcançar uma abordagem mais integrada do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, avaliando a opinião de todas as partes envolvidas na avaliação do problema, no processo de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. O planejamento e gerenciamento de recursos hídricos não é simplesmente a aplicação e implementação da ciência, mas sim um ambiente social que envolve todos os consumidores de água, em um processo contínuo de planejamento (Figura 2).

Conforme destacado, a falta de integração no gerenciamento de recursos hídricos gera dificuldades no processo de planejamento, justamente pela separação das autoridades de cada área científica, o que, por sua vez, resulta em falta de objetividade por parte dos planejadores. O planejamento e a gestão eficazes dos recursos hídricos se mostram como um grande desafio nos dias atuais e, claramente, serão um desafio ainda maior no futuro próximo.

Anos de escassez podem ser em parte previstos através das séries históricas de chuvas e, sabendo que esses anos de escassez ocorrerão, a seca pode ser mitigada por políticas de racionamento e, a longo prazo, construção de reservatórios. Questiona-se,

Figura 2 – Conexões entre gerenciamento e gestão de recursos hídricos.



Fonte: Adaptado de Loucks (2017)

então, os motivos de ainda existirem pessoas sofrendo por falta de água no interior do Nordeste. Por parte, não é vantajoso para que os governantes resolvam este problema. Em um estado de calamidade causado pela seca, o estado consegue mais verbas, incentivos e perdão de dívidas, sob argumento de que as pessoas estão morrendo de sede e fome. Todavia, em alguns casos, ocorrem desvios destas verbas e superfaturamento nas obras.

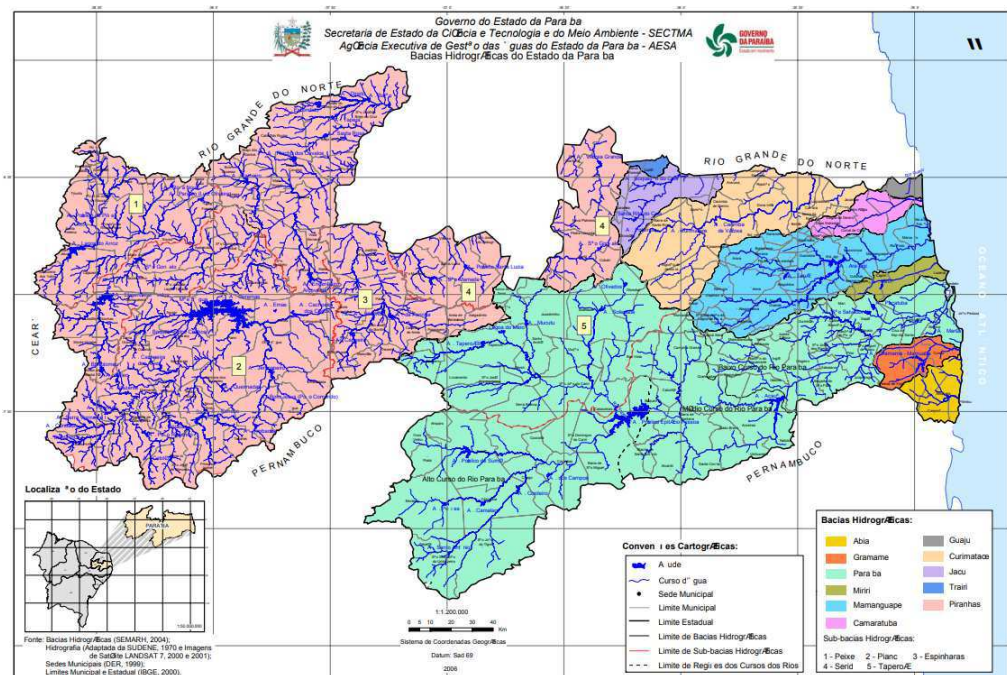
Dessa forma surge o termo **Indústria da Seca**, cunhado pelo autor Antônio Callado, em sua obra “Os industriais da seca e os "Galileus" de Pernambuco: aspectos da luta pela reforma agrária no Brasil” (1960). O termo surgiu originalmente para explicar como os governantes se utilizam do clima e escassez de chuvas no Nordeste em benefício próprio, como no coronelismo e no voto de cabresto, que utilizam da inocência e pobreza da população para o surgimento de oligarquias nos estados nordestinos.

### 2.1.2 Gestão de recursos hídricos na Paraíba

Por sofrer períodos longos de seca, caracterizado por altas temperaturas e chuvas sazonais, a Paraíba possui reservatórios de grande capacidade volumétrica, com o intuito de suprir a população do estado por maior período de tempo, considerado a baixa incidência de precipitações anuais e, dessa maneira, menor escoamento para as bacias, o que implica em menor recarga dos reservatórios. Sobretudo nestes casos, ressalta-se a importância de uma gestão efetiva de recursos hídricos. As decisões em âmbito de bacia hidrográfica são tomadas por 5 comitês: Litoral Norte, Litoral Sul, Piranhas-Açu, Rio Paraíba e Águas da Paraíba (Figura 3).

A AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba - é o órgão gestor de águas no estado, criado com intuito de gerenciar os recursos hídricos subterrâneos

Figura 3 – Bacias Hidrográficas do estado da Paraíba.



Fonte: AESA (2016)

e superficiais do estado da Paraíba, e também de águas de bacias hidrográficas de outros estados, transferidas através de obras do Governo Federal e, portanto, de águas de domínio da União que ocorrem em território do estado da Paraíba (AESA, 2016).

Conforme a lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, é competência do órgão gestor das águas de um estado elaborar planos diretores, que objetivam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), além do gerenciamento em si destes recursos.

Como se tratam de planos de longa duração, com longos períodos de implantação, devem apresentar um conteúdo mínimo em seu corpo, como o diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos, análise de alternativas de crescimento demográfico, balanço entre oferta e demanda futuras dos recursos, metas de racionalização de uso, medidas a serem tomadas e programas a serem desenvolvidos, prioridades para outorga e direitos de uso e, por fim, propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso.

De acordo com Nunes (2015), a legislação de recursos hídricos no estado teve avanços nas últimas décadas, com a promulgação da Lei nº 6.308, que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba (PERH-PB), “promovendo o uso racional destes recursos, para a promoção do desenvolvimento e do bem estar da população do Estado da Paraíba”. A Lei apresenta, em seu Art. 2º, os seguintes princípios básicos:

- O acesso aos Recursos Hídricos é direito de todos e objetiva atender às necessidades

essenciais da sobrevivência humana.

- Os Recursos Hídricos são um bem público, de valor econômico, cuja utilização deve ser tarifada.
- A bacia hidrográfica é uma unidade básica físico-territorial de planejamento e gerenciamento dos Recursos Hídricos.
- O gerenciamento dos Recursos Hídricos far-se-á de forma participativa e integrada, considerando os aspectos quantitativos e qualitativos desses Recursos e as diferentes fases do ciclo hidrológico.
- O aproveitamento dos Recursos Hídricos deverá ser feito racionalmente de forma a garantir o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente.
- O aproveitamento e o gerenciamento dos Recursos Hídricos serão utilizados como instrumento de combate aos efeitos adversos da poluição, da seca, de inundações, do desmatamento indiscriminado, de queimadas, da erosão e do assoreamento.

Embora de grande importância para o desenvolvimento da unidade federativa da Paraíba, o PERH-PB, segundo Vieira e Ribeiro (2007), não foi elaborado participativamente, e, portanto, se mostrou incompleto, haja vista que o plano não contemplou a problemática dos conflitos hídricos existentes nas bacias hidrográficas do estado, nem foram definidos critérios e prioridades para concessão de outorgas de direitos de uso da água e nem indicados diretrizes e critérios para cobrança pelo uso dos recursos hídricos, deixando de ser atendido o conteúdo mínimo do PNRH, como citado anteriormente.

## 2.2 Regularização de vazão e vazão outorgável

De acordo com Collischonn e Dornelles (2015), a oscilação de valores de precipitação e a flutuação na vazão dos rios origina situações diversas, de excesso ou falta de vazão, a depender da vazão demandada deste. Para resolução ou mitigação deste problema uma solução é a regularização através da construção e utilização de reservatórios. No caso do açude Epitácio Pessoa não seria diferente, pois o reservatório está localizado numa região de variabilidade interanual rápida com longos anos de escassez, necessitando de uma grande capacidade volumétrica para ser capaz de abastecer a população nestes anos de baixa recarga.

A partir disso, surge a necessidade de cauteloso estudo hidrológico seguindo manuais e a Política Nacional de Recursos Hídricos para cálculo da vazão outorgável que será usada para abastecimento e diversos usos, sem comprometer o volume do reservatório. Pode-se

calcular a vazão outorgável através da equação 2.1 para captação a fio d'água e equação 2.2 com reservatório de regularização.

$$Q_{outorgavel.i} = c \cdot (Q_{95})_i \cdot Q_{indisponivel.i} \quad (2.1)$$

$$Q_{outorgavel.i} = Q_{regularizavel.i} - (1 - c) \cdot (Q_{95})_i \cdot Q_{indisponivel.i} \quad (2.2)$$

$$Q_{indisponivel.i} = \sum Q_{outorgadas.m} + \sum Q_{outorgadas.i}$$

Onde:

$Q_{outorgavel.i}$  é vazão máxima que pode ser outorgada na seção  $i$  do corpo hídrico superficial.

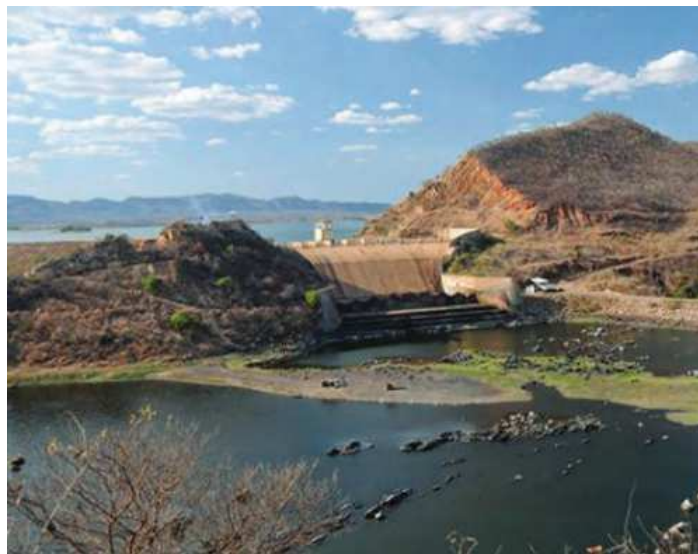
$c$  é o coeficiente que limita a porcentagem da vazão natural com permanência de 95% do tempo na seção  $i$ .

$Q_{regularizavel.i}$  é a vazão regularizável na seção  $i$  do corpo hídrico superficial.

$(Q_{95\%})_i$  é a vazão natural com permanência de 95% do tempo na seção  $i$ .

$Q_{outorgadas.m}/Q_{outorgadas.i}$  são as vazões outorgadas a montante e jusante da seção  $i$ .

Figura 4 – Açude para regularização de vazões.

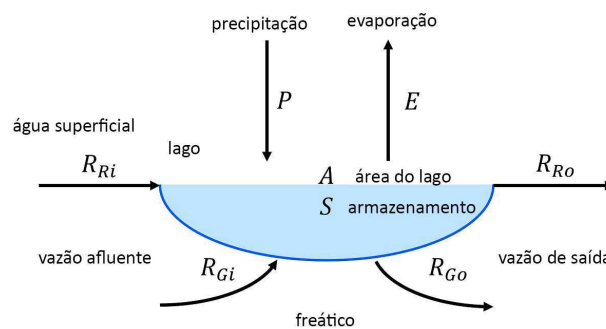


Fonte: ANA (2011)

## 2.3 O balanço hídrico

O balanço hídrico é uma equação que indica as entradas e saídas de água em um reservatório. Como valores de entrada, podemos mencionar as vazões afluentes ao reservatório, provenientes da parcela de precipitação que escoam superficialmente, subsuperficialmente ou subterraneamente (inclusive a sangria dos açudes a montante) e os valores de saída são as perdas por evaporação, por exemplo, e as retiradas para demanda de abastecimento humano e animal, além dos volumes extravasados.

Figura 5 – Entradas e saídas de água em um reservatório.



Quando as vazões de saída superam as vazões de entrada, ou seja, a vazão retirada ou evaporada supera a recarga do reservatório, inicia-se um processo de depleção do volume reservatório. Com o passar do tempo, caso não hajam recargas suficientes pra suprir as vazões de saída, o reservatório pode atingir o volume morto, ou volume intangível do reservatório. A água presente no volume morto deve ter seu uso evitado devido a má qualidade da água ali presente. Desta forma, quando o reservatório se encontra em volume morto, não é possível realizar retiradas de água, e para esta situação se denomina o conceito de falha.

De acordo com os dados da AESA (2016), das análises dos resultados obtidos com as simulações do sistema hídrico do Alto e Médio Cursos do Rio Paraíba (região onde está localizado o açude de Boqueirão), pode-se fazer as seguintes considerações:

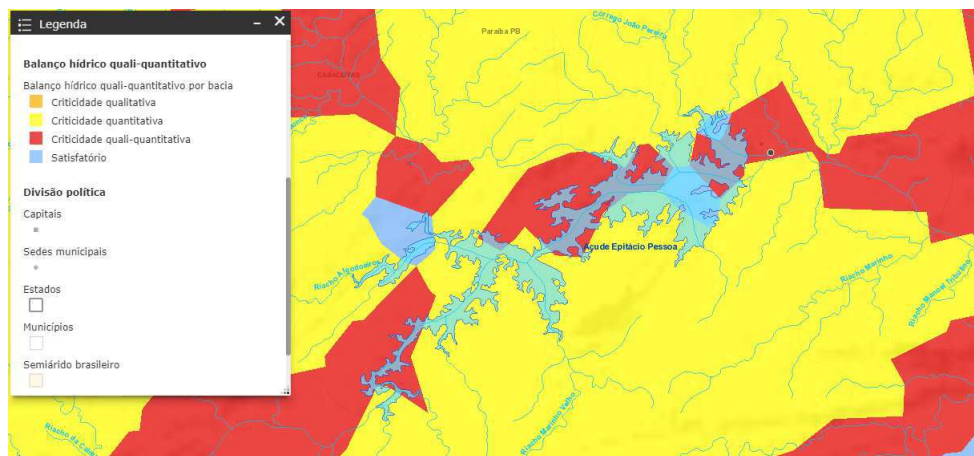
- O sistema hídrico do Alto e Médio Cursos do rio Paraíba encontra-se numa situação mais confortável do que a bacia do rio Taperoá, no tocante ao atendimento às demandas hídricas supridas por esse sistema. Dos 17 reservatórios integrantes do sistema, 12 atenderam as demandas hídricas estabelecidas para tais, com percentuais aceitáveis para o atendimento, onde a menor garantia foi de 82,3%.
- A vazão média fornecida pelo Alto Curso do rio Paraíba para o reservatório Boqueirão foi de  $3,36 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- A vazão máxima que o referido sistema poderia oferecer para as demandas difusas (irrigação), seria de 300 l/s. Considerando um consumo médio unitário de 0,42 l/s.ha – estimado com base no Plano Nacional de Recursos Hídricos (UFPB/MMA, 1998), daria para irrigar uma área de até 461,5 ha, não se levando em conta as perdas no processo.
- Para o Médio Curso do rio Paraíba, no estudo representado somente pelo reservatório Acauã, este atendeu as demandas hídricas com garantia de 100% e ainda poderia fornecer, para o rio Paraíba, uma vazão média de 6,50 m<sup>3</sup>/s.

Outro parâmetro de considerável relevância para a análise de um corpo hídrico é o balanço quali-quantitativo. O balanço quantitativo é a relação entre as demandas de consumo (ou vazão demandada) e a disponibilidade hídrica (vazão ofertada), enquanto o balanço qualitativo considera a capacidade de depuração de poluentes pelos corpos d'água. Desta forma, o balanço quali-quantitativo é uma análise sob duas perspectivas da criticidade do corpo hídrico, sob estes dois pontos de vista (qualitativo e quantitativo), podendo a bacia ser classificada como de criticidade qualitativa, quantitativa, quali-quantitativa ou satisfatória.

A Figura 6 ilustra os pontos onde há algum tipo de criticidade no Açude Epitácio Pessoa, localizado na bacia do Alto Paraíba. Nela, pode-se observar, em quase todo o corpo hídrico, a presença de criticidade quantitativa, relativa à oferta e demanda de água. A mancha amarela retrata a baixa recarga hídrica do reservatório, devido a escassez de chuvas na região. Há, também, a presença de criticidade quali-quantitativa, principalmente nos locais de extremidades da massa d'água, possivelmente por ser de áreas habitadas por população ribeirinha, que coleta e utiliza desta água diretamente para uso doméstico.

Figura 6 – Balanço quali-quantitativo na região do Açude de Boqueirão.



Fonte: SNIRH (2019)

## 2.4 Operação de reservatórios por simulação

Os modelos de simulação para operação de reservatórios são ferramentas computacionais que simulam o balanço hídrico num reservatório, com o fim de auxiliar os operadores nas tomadas de decisões e políticas hídricas (GALVÃO e OLIVEIRA, 2004). As variáveis destes modelos podem ser de entrada, a exemplo de vazões afluentes, vazões de demanda e limites operacionais; de estado, cujos valores flutuam durante a simulação; ou de saída, que são os resultados da simulação, como vazões ótimas a serem liberadas para determinada situação.

O reservatório Boqueirão utiliza o método da simulação através de previsões meteorológicas para realizar o controle de demanda e liberação de água. O método das simulações possibilita determinar a garantia do sistema, em observância com os períodos de estiagem, que variam de acordo com diversos fatores climáticos e hidrológicos. Estes períodos podem ser previstos com uma série histórica mais longa (maior abrangência temporal), o que aumenta a confiabilidade do método. As políticas nas quais o modelo irá operar dependerão da situação em questão. Podem ser baseadas em um volume "ótimo" para operação e, baseado na curva-guia, o modelo fornecerá a garantia que o reservatório poderá atender as demandas.

Para uma operação adequada de reservatórios de abastecimento, busca-se equilíbrio entre oferta e demanda dos recursos hídricos. Dessa forma, caso haja escassez de água (menor vazão afluente), os usuários deverão ter sua oferta reduzida (menor vazão demandada) até que se o balanço retome, evitando colapso do sistema. Este conceito é chamado de nível de alerta, que é definido pelo operador do sistema e cujos critérios devem se basear numa menor escassez de oferta para a população, além de menores valores de evaporação e custos. Pode ser definido mais que um nível de alerta, e para cada nível atingido, atribui-se uma situação específica, onde quanto menor o volume armazenado, mais restrito será o racionamento.

Na região do semi-árido, onde existem anos úmidos e de escassez, são necessários dados de muitos anos em sequência para se ter uma simulação adequada, pois os anos úmidos "puxam" a média de vazões afluentes para cima, escondendo os valores dos anos de escassez (GALVÃO e OLIVEIRA, 2004). A otimização por programação dinâmica fornece diretamente uma tabela de liberações mensais, enquanto através da simulação se tem diversos resultados, fornecendo um maior escopo de soluções para o sistema.

De acordo com Loucks (2017), os modelos de simulação buscam responder às perguntas "e se?": o que provavelmente irá acontecer durante certo período de tempo em um ou mais lugares específicos se uma política de operação for implementada? O que deverá acontecer nesses locais se esta política for alterada? Os métodos de simulação também funcionam bem com os métodos de otimização, uma vez que a simulação de



diversos cenários e diversas variáveis pode demorar algum tempo, a otimização permite reduzir as alternativas a serem avaliadas e então, por decisão humana, determinar os cenários a serem simulados. Em suma, conhecendo os valores das variáveis de decisão, a simulação pode prover estimativas mais precisas dos impactos que certas decisões irão causar.

Por fim, o método da simulação, apesar de ser o mais prático, apresenta erros em seu resultado final, pois, segundo Nohara (2011), a utilização de previsões meteorológicas para a operação de reservatórios se mostra imprecisa para muitos meses à frente. Por outro lado, dados meteorológicos globais incluem informações a longo prazo sobre condições hidrológicas nos balanços das bacias. Com dados de previsões quantitativos, faz-se possível a confecção de um algoritmo de extração para informações úteis sobre as condições da bacia, como a precipitação, e com estes dados, pode-se obter dados mais fiéis as condições reais da bacia, obtendo simulações mais robustas.

## 2.5 Medidas de performance do sistema

Os critérios de análise de performance são parâmetros capazes de capturar determinados aspectos de um sistema, sobretudo em períodos de seca, altas demandas ou de clima extremo. Entende-se como falha a performance insatisfatória do sistema, seja como uma falha estrutural de uma barragem, inundações, terremotos, seca e picos inesperados de demanda.

Os seguintes critérios foram formulados por Hashimoto (1982), considerando que a performance de um sistema de recursos hídricos pode ser descrito como um processo estocástico estacionário, ou seja, cujas distribuições de probabilidades não se alteram com o tempo, o que não acontece na realidade, mas é uma aproximação bastante razoável desta.

### 2.5.1 Confiabilidade

Explicita o estado do sistema pela variável aleatória  $X_t$ , no tempo  $t$ , onde  $t$  é um valor discreto (1, 2, 3, ...) podendo pertencer a dois conjuntos,  $S$ , o conjunto de resultados satisfatórios e  $F$ , conjunto de todos resultados insatisfatórios. A confiabilidade, então, pode ser descrita pela probabilidade  $\alpha$  de o sistema estar no estado satisfatório:

$$\alpha = P[X_t \in S] \quad (2.3)$$

Este indicador no estudo da operação de reservatórios explicita, de 0 a 1, o quão confiável aquela política pode ser para o sistema, ou seja, quantos sucessos no abastecimento serão obtidos no espaço de tempo total simulado.

### 2.5.2 Resiliência

Indica o quão rápido o sistema se recupera da falha, dado que uma falha no sistema ocorra, sendo  $\gamma$  equivalente a probabilidade média de recuperação de um conjunto insatisfatório num único passo de tempo, utilizando a notação de conjuntos do critério anterior:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{P[X_t \in F \text{ e } X_{t+1} \in S]}{P[X_t \in F]} \\ &= P[X_{t+1} \in S \mid X_t \in F]\end{aligned}\tag{2.4}$$

Desta forma, o indicador de resiliência irá analisar a quantidade de grupos de falhas sobre o total de falhas do sistema. Isso quer dizer que, ao apresentar uma quantidade maior de falhas do que de grupos de falhas, o sistema não será totalmente resiliente, pois isso indica que o sistema não se recuperou completamente da falha no passo de tempo imediatamente anterior.

### 2.5.3 Vulnerabilidade

O critério de vulnerabilidade indica o quão severas as consequências da falha do sistema podem ser. Considerando cada estado discreto  $x_j \in F$ , denotado pelo indicador numérico  $s_j$  e assumindo  $e_j$  como a probabilidade de que  $x_j$  seja o resultado mais insatisfatório e severo entre o conjunto de estados insatisfatórios  $F$ , temos:

$$e_j = P[x_j \text{ ser o resultado mais severo em } F]$$

Dessa forma, uma métrica para a vulnerabilidade geral do sistema seria a severidade máxima esperada no conjunto de estados insatisfatórios, enfatizando em o quão ruins podem ser os resultados, e não em quanto tempo a falha persiste, conforme Eq. 2.3 a seguir:

$$v = \sum_{j \in F} s_j e_j\tag{2.5}$$

A vulnerabilidade é um importante indicador em complemento aos demais, pois diferentemente dos dois primeiros, seu intuito é mensurar o quão prejudicial pode ser uma falha no sistema, ao invés de quão rápido o sistema se recupera ou qual a probabilidade de o sistema atender a determinada demanda.

## 2.6 Programação dinâmica

De acordo com Chaves (2005), a programação dinâmica (DP) foi inicialmente desenvolvida em meados dos anos 1950 pela Corporação *RAND* e patrocinada pelas

Forças Armadas dos Estados Unidos da América. Foi nomeada e descrita por Richard Bellman em 1959, e apresenta várias vantagens sobre outros métodos para abordar aspectos do gerenciamento dos recursos hídricos, podendo ser associada a outras técnicas como a denominada programação dinâmica estocástica (SDP). Esta técnica de programação dinâmica pode ser aplicada na otimização da operação do reservatório usando dados de conjuntos de previsões.

Ainda segundo Chaves (2005), através de programação dinâmica, é possível se dividir um problema qualquer (de difícil otimização) em uma série de problemas menores interconectados, cada um contendo poucas variáveis. O resultado é uma série de otimizações parciais, necessitando de menos iterações para se encontrar um resultado otimizado. O algoritmo de DP pode ser aplicado para encontrar uma solução de todo o processo, utilizando otimizações parciais conectadas, de problemas menores, conforme Figura 7 a seguir.

Figura 7 – Algoritmo de aplicação da DP.

```

para cada mês do ano ( $n = 1$  a  $12$ ):
{
  para cada nível de armazenamento do reservatório ( $s = s_{min}$  a  $s_{max}$ ):
  {
    para cada nível de liberação ( $r = r_{min}$  a  $r_{max}$ ):
    {
       $s_1 = s + i - e - r$ 
      se  $s_1 < s_{min}$  então  $s_1 = s_{min}$ 
      se  $s_1 > s_{max}$  então  $s_1 = s_{max}$ 
       $f(n, s, r) = (r_{max} - r) / r_{max} + fo(n-1, s_1)$ 
      se  $f(n, s, r) < fo(n, s)$  então  $fo(n, s) = f(n, s, r)$ 
    }
  }
}

```

Fonte: Galvão et al. (1994)

A programação dinâmica estocástica pode ser considerada como o método mais eficiente para manejo de características futuras desconhecidas (que seguem algum modelo probabilístico) o que aumenta a robustez do modelo de otimização. Desta forma, para um sistema estocástico (variáveis aleatórias que se alteram com o tempo), a equação básica que governa a otimização quantitativa de reservatórios é:

$$F_t(S_t, I_{t-1}) = \max_{S_{t+1}} \left\{ \sum_{k=1}^K P(I_{t,k}/I_{t-1}) \cdot [E_t(\cdot) + F_{t+1}(S_{t+1}, I_t)] \right\} \quad (2.6)$$

Onde:

$F, E$  são as funções objetivo recursiva e de avaliação, respectivamente, no tempo  $t$

$S_t$  é o armazenamento de água no passo de tempo  $t$

$R_t$  é a liberação de água no tempo  $t$

$I_{t,k}$  é o escoamento no tempo  $t$ , de nível de probabilidade discreta  $k$

$P(I_{t,k}/I_{t-1})$  é a probabilidade condicional de ocorrência de  $I_{t,k}$  dado um escoamento do mês anterior de  $I_{t-1}$

Um ambiente estocástico, por sua vez, pode ser modelado por sistemas *Markovianos*. Uma cadeia de *Markov* é uma coleção de variáveis aleatórias, num determinado período de tempo, onde o aspecto mais crítico – heurísticamente – em oposição a qualquer outro conjunto de variáveis aleatórias, é que este conjunto esquece todo o passado de eventos, exceto os que ocorreram imediatamente antes.

## 3 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentados os métodos utilizados no decorrer deste trabalho, assim como considerações acerca de parâmetros adotados. O principal método explorado será o método das simulações com auxílio da planilha Hidro. Resumidamente, a metodologia se dividirá nas seguintes etapas:

1. Definição da área de estudo aonde o método será aplicado;
2. Definição dos parâmetros de entrada conforme dados coletados *in loco* e via empresas públicas de gestão de água;
3. Elaboração de múltiplos cenários para simulação, alterando níveis de alerta e reduções de oferta do reservatório;
4. Análise dos cenários via critérios de performance do sistema (Hashimoto, 1982).

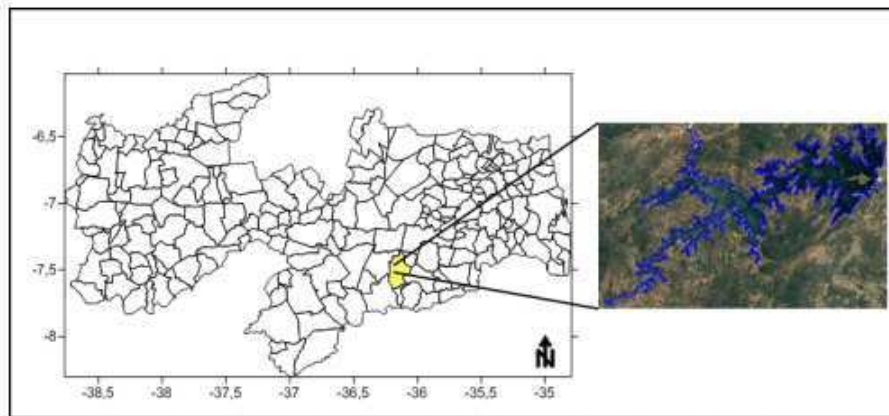
### 3.1 Definição da área de estudo

O açude Epitácio Pessoa, localizado na Região do Alto Curso do Rio Paraíba (Figura 8), comumente conhecido como Açude Boqueirão, tem uma capacidade máxima de 466.525.964 m<sup>3</sup> (ANA, 2019). Este açude está localizado no município de Boqueirão, se estendendo por Cabaceiras e São Miguel de Taipu, no estado da Paraíba, região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, e abastece diversas cidades, como Barra de São Miguel, Boqueirão, Campina Grande, Caturité, Pocinhos, Queimadas e Riacho de Santo Antônio.

As obras de construção do açude se deram em um período de aproximadamente quatro anos, sendo a barragem construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS, 1963). Deu-se início às obras em julho de 1953, continuando por um período de seis meses, até ser interrompida por períodos chuvosos. No ano seguinte, foram completadas as obras de fundação e elevado o aterro a uma altura de aproximadamente 30 m. Os trabalhos finais consistiram da complementação do maciço, ocorrendo de junho de 1955 a novembro de 1956.

De acordo com Bezerra (2018), a estação seca dura entre nove a dez meses e o período chuvoso ocorre entre meses de fevereiro e julho, chuvas características pela vinda de massas do Sertão e do Litoral, concomitantemente. Com temperaturas mínimas de 18 a 22 °C entre os meses de julho e agosto, e máximas de 28 a 31 °C entre os meses de novembro e dezembro, a evaporação anual varia entre 2.500 a 3.000 mm, com média pluviométrica anual de 250 a 750 mm, concentradas entre os meses de fevereiro e maio, segundo informações do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.

Figura 8 – Situação e localização do Açude de Boqueirão.



Fonte: Bezerra *et al* (2018)

Corroborando com Rêgo *et al.* (2017), a intensa seca que iniciou-se em 2012 foi o marco inicial de anos de pouca precipitação, ocasionando uma rápida queda no nível de água disponível no reservatório de Boqueirão, o que tornou visível o estado precário da gestão dos seus recursos hídricos. Com a continuação da seca nos anos posteriores, houve comoção do corpo técnico e autoridades políticas e judiciais, para que houvesse mitigação do dano causado pelos anos secos posteriores (conforme Figura 9), mesmo que este evento já fosse conhecido a priori por especialistas (e imprensa), o que deveria ter implicado num plano eficiente de contingência pelos gestores responsáveis, o que não ocorreu.

Figura 9 – Variação no volume percentual armazenado, entre os anos de 2010 e 2019.



Fonte: Olho n'água (2018)

Portanto, destaca-se a importância de um plano eficiente de gestão de recursos hídricos, que implica em saber, de maneira precisa, o quanto pode ser retirado do reservatório sem comprometer sua capacidade (vazão de regularização) e, não obstante, o

quanto de água as precipitações fornecem para o volume do reservatório (vazão afluyente), considerando que nem toda precipitação na região contribui com a bacia do Rio Paraíba, e nem toda a água escoada pode ser utilizada, a exemplo do volume morto e volume evaporado.

## 3.2 Parâmetros de entrada para a simulação de cenários

Nesta seção são apresentados alguns valores de entrada utilizados para dar início ao processo de simulação dos cenários. As subseções a seguir irão explicar resumidamente o conceito e valores assumidos para cada parâmetro.

### 3.2.1 Vazões demandadas, vazões afluentes e lâmina evaporada

A vazão demandada é um parâmetro definido a priori pelo operador, baseando-se em critérios como população à ser abastecida, indústria, etc.. No método de simulações, pode ser testado um valor qualquer de vazão demandada e, a partir deste, obter a garantia de abastecimento da população ou, através do método iterativo, encontrar um valor "ideal" para o valor de vazão, observando a quantidade de falhas. A forma como as vazões demandadas dos diversos cenários do presente trabalho foram determinadas será demonstrada em tópicos posteriores.

A vazão afluyente é a recarga hídrica do reservatório, podendo ser estimada a partir de modelos de vazão, ou seja, modelos que convertam a precipitação em escoamento efetivo. Este procedimento nem sempre é tão simples, pois existem obstáculos naturais ao caminho da água, desde árvores, depressões no solo, rochas, entre outros desvios. Os dados foram coletados através de série históricas de 1963 a 2003 através de Nunes (2015) e foram utilizadas na simulação através de médias das vazões afluentes de cada mês.

Quanto a lâmina evaporada, foram utilizados médias de dados de Oliveira (2005), obtidos através de dados experimentais de tanque classe A testados na Bacia Escola de São João do Cariri da Universidade Federal de Campina Grande (1987 a 2008).

### 3.2.2 Curva cota-área-volume

A curva é obtida do projeto do reservatório ou de batimetrias *in loco* e o modelo de simulação interpola as informações necessárias entre os pontos coletados. O órgão responsável pela realização de levantamentos batimétricos é a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAPB), e os dados são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 – Pontos da curva e seus respectivos valores de cota, área e volume.

| Ponto | Cota (m) | Área ( $m^2$ ) | Volume ( $m^3$ ) |
|-------|----------|----------------|------------------|
| 1     | 343,00   | 37.223         | 16.994           |
| 2     | 344,00   | 70.593         | 69.800           |
| 3     | 345,00   | 142.867        | 174.286          |
| 4     | 346,00   | 257.180        | 366.771          |
| 5     | 347,00   | 421.869        | 707.956          |
| 6     | 348,00   | 631.536        | 1.230.617        |
| 7     | 349,00   | 873.903        | 1.981.542        |
| 8     | 350,00   | 1.158.564      | 2.990.176        |
| 9     | 351,00   | 1.506.467      | 4.314.820        |
| 10    | 352,00   | 1.866.251      | 5.996.469        |
| 11    | 353,00   | 2.261.179      | 8.058.687        |
| 12    | 354,00   | 2.697.741      | 10.529.191       |
| 13    | 355,00   | 3.217.443      | 13.477.904       |
| 14    | 356,00   | 3.859.121      | 17.006.273       |
| 15    | 357,00   | 4.556.783      | 21.217.917       |
| 16    | 358,00   | 5.260.937      | 26.112.154       |
| 17    | 359,00   | 6.158.316      | 31.819.531       |
| 18    | 360,00   | 7.030.425      | 38.416.664       |
| 19    | 361,00   | 8.029.009      | 45.934.680       |
| 20    | 362,00   | 8.999.597      | 54.453.579       |
| 21    | 363,00   | 10.013.408     | 63.965.416       |
| 22    | 364,00   | 11.031.533     | 74.490.376       |
| 23    | 365,00   | 12.260.463     | 86.139.409       |
| 24    | 366,00   | 13.693.060     | 99.074.597       |
| 25    | 367,00   | 15.486.319     | 113.650.769      |
| 26    | 368,00   | 17.365.964     | 130.099.018      |
| 27    | 369,00   | 19.443.185     | 148.504.719      |
| 28    | 370,00   | 21.743.159     | 169.122.415      |
| 29    | 371,00   | 24.290.550     | 192.184.935      |
| 30    | 372,00   | 26.752.308     | 217.765.387      |
| 31    | 373,00   | 29.120.116     | 245.796.027      |
| 32    | 374,00   | 31.256.425     | 276.130.869      |
| 33    | 375,00   | 33.046.998     | 308.486.064      |
| 34    | 376,00   | 34.539.523     | 342.495.505      |
| 35    | 377,00   | 36.142.787     | 377.846.134      |
| 36    | 377,55   | 38.135.841     | 397.990.704      |
| 37    | 377,90   | 39.623.321     | 411.686.287      |



### 3.2.3 Série histórica de precipitações

Foi utilizada uma série histórica obtida através de dados da AESA (2020), consistindo em dados de janeiro de 1963 até dezembro de 2003, totalizando uma série de 41 anos. Através destes dados, é possível calcular as precipitações médias mensais, que servem de base para a simulação de cenários de afluência e demanda, através dos quais serão definidos os níveis críticos de operação.

Figura 10 – Série histórica de precipitações de 41 anos, entre 1963 e 2003

| Total | Ano  | Jan<br>1 | Fev<br>2 | Mar<br>3 | Abr<br>4 | Mai<br>5 | Jun<br>6 | Jul<br>7 | Ago<br>8 | Set<br>9 | Out<br>10 | Nov<br>11 | Dez<br>12 |
|-------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1     | 1963 | 28,70    | 75,20    | 108,00   | 62,50    | 16,10    | 14,20    | 4,20     | 1,30     | 1,40     | 0,10      | 3,80      | 109,00    |
| 2     | 1964 | 58,10    | 82,60    | 116,20   | 92,20    | 54,80    | 47,80    | 45,00    | 9,90     | 12,40    | 0,80      | 1,50      | 5,30      |
| 3     | 1965 | 36,00    | 7,90     | 98,40    | 202,10   | 36,40    | 96,40    | 12,60    | 8,60     | 2,80     | 10,50     | 0,50      | 10,00     |
| 4     | 1966 | 40,10    | 96,00    | 6,30     | 131,30   | 35,90    | 54,30    | 63,80    | 4,50     | 6,50     | 1,60      | 24,40     | 5,70      |
| 5     | 1967 | 4,50     | 87,50    | 146,90   | 180,50   | 111,10   | 26,10    | 25,80    | 10,40    | 3,80     | 1,20      | 0,40      | 30,00     |
| 6     | 1968 | 30,90    | 23,50    | 151,60   | 99,20    | 75,70    | 12,10    | 9,20     | 0,50     | 0,30     | 0,00      | 1,20      | 2,60      |
| 7     | 1969 | 47,70    | 16,50    | 126,70   | 88,60    | 34,40    | 64,90    | 78,50    | 9,30     | 0,10     | 0,30      | 0,00      | 0,10      |
| 8     | 1970 | 73,40    | 16,60    | 81,20    | 57,40    | 6,20     | 17,60    | 42,10    | 7,80     | 0,00     | 6,80      | 1,50      | 0,50      |
| 9     | 1971 | 6,40     | 13,90    | 88,60    | 172,00   | 47,30    | 27,90    | 32,10    | 10,50    | 6,90     | 9,40      | 0,70      | 0,20      |
| 10    | 1972 | 2,00     | 76,90    | 58,60    | 56,80    | 27,90    | 27,30    | 11,70    | 51,60    | 0,70     | 0,40      | 0,00      | 54,10     |
| 11    | 1973 | 17,90    | 26,70    | 98,30    | 151,20   | 42,90    | 20,80    | 23,30    | 5,40     | 8,50     | 13,70     | 0,30      | 4,20      |
| 12    | 1974 | 106,70   | 135,30   | 136,00   | 236,00   | 64,10    | 44,00    | 36,10    | 1,60     | 2,60     | 0,00      | 13,40     | 18,60     |
| 13    | 1975 | 11,50    | 53,60    | 150,50   | 147,10   | 65,90    | 36,20    | 99,80    | 5,50     | 8,40     | 0,20      | 0,10      | 60,70     |
| 14    | 1976 | 5,90     | 92,00    | 93,40    | 60,40    | 29,20    | 6,20     | 7,30     | 1,90     | 2,10     | 32,40     | 10,50     | 3,30      |
| 15    | 1977 | 65,20    | 10,10    | 60,80    | 214,40   | 103,80   | 72,90    | 85,40    | 2,90     | 5,80     | 0,90      | 0,00      | 5,90      |
| 16    | 1978 | 0,20     | 89,50    | 165,00   | 90,40    | 94,50    | 52,10    | 46,10    | 6,40     | 9,90     | 0,40      | 1,50      | 2,20      |
| 17    | 1979 | 26,90    | 43,70    | 42,50    | 48,40    | 59,30    | 10,80    | 17,70    | 0,70     | 12,20    | 0,00      | 7,30      | 0,10      |
| 18    | 1980 | 9,20     | 105,20   | 57,90    | 18,70    | 5,70     | 37,30    | 2,00     | 0,50     | 0,10     | 2,40      | 5,80      | 0,80      |
| 19    | 1981 | 56,10    | 8,70     | 268,90   | 31,20    | 13,10    | 3,70     | 1,10     | 0,20     | 0,80     | 0,00      | 9,20      | 16,70     |
| 20    | 1982 | 2,80     | 18,30    | 15,00    | 84,30    | 50,80    | 35,60    | 9,70     | 6,50     | 3,40     | 1,10      | 0,00      | 3,30      |
| 21    | 1983 | 13,80    | 98,00    | 48,40    | 18,60    | 16,70    | 13,60    | 6,80     | 9,70     | 0,20     | 0,90      | 0,10      | 0,10      |
| 22    | 1984 | 7,40     | 4,20     | 100,10   | 197,80   | 84,20    | 16,00    | 32,20    | 30,80    | 8,40     | 2,00      | 0,60      | 0,10      |
| 23    | 1985 | 54,70    | 277,50   | 184,50   | 286,80   | 26,80    | 56,50    | 26,40    | 10,70    | 0,60     | 0,00      | 0,20      | 14,00     |
| 24    | 1986 | 48,50    | 148,90   | 198,80   | 86,50    | 36,00    | 23,70    | 39,20    | 24,60    | 4,70     | 1,40      | 6,00      | 2,10      |
| 25    | 1987 | 16,60    | 27,30    | 152,30   | 43,40    | 5,80     | 30,10    | 15,70    | 3,50     | 0,20     | 0,10      | 0,00      | 0,00      |
| 26    | 1988 | 9,90     | 72,40    | 131,90   | 118,90   | 17,90    | 21,30    | 38,70    | 2,30     | 1,20     | 0,10      | 1,80      | 18,20     |
| 27    | 1989 | 12,00    | 7,10     | 72,40    | 161,50   | 55,40    | 35,40    | 57,20    | 14,40    | 0,50     | 4,70      | 2,70      | 81,90     |
| 28    | 1990 | 0,60     | 43,90    | 0,40     | 29,60    | 18,40    | 16,50    | 19,70    | 2,30     | 2,20     | 0,80      | 1,40      | 0,30      |
| 29    | 1991 | 3,60     | 35,80    | 128,10   | 27,60    | 38,60    | 7,80     | 6,60     | 12,50    | 0,00     | 0,20      | 1,30      | 0,00      |
| 30    | 1992 | 23,20    | 13,00    | 9,20     | 14,50    | 0,70     | 4,00     | 5,40     | 2,10     | 4,90     | 0,00      | 0,00      | 0,00      |
| 31    | 1993 | 6,00     | 1,00     | 1,20     | 1,90     | 26,80    | 10,40    | 14,90    | 2,10     | 2,70     | 4,10      | 0,00      | 0,30      |
| 32    | 1994 | 63,10    | 75,50    | 99,70    | 40,30    | 74,80    | 60,80    | 30,30    | 8,60     | 9,40     | 0,40      | 0,30      | 18,20     |
| 33    | 1995 | 31,90    | 101,40   | 128,30   | 80,20    | 92,30    | 24,60    | 36,90    | 2,10     | 0,20     | 0,10      | 44,10     | 1,10      |
| 34    | 1996 | 21,90    | 17,90    | 129,50   | 144,70   | 39,70    | 19,30    | 25,30    | 20,40    | 11,30    | 5,10      | 16,00     | 3,00      |
| 35    | 1997 | 52,80    | 22,30    | 146,70   | 58,80    | 78,90    | 11,00    | 22,60    | 19,40    | 2,10     | 3,50      | 7,40      | 22,70     |
| 36    | 1998 | 28,40    | 4,70     | 24,50    | 27,70    | 8,40     | 8,00     | 15,40    | 23,60    | 0,30     | 0,60      | 0,30      | 0,90      |
| 37    | 1999 | 18,40    | 18,80    | 79,20    | 3,60     | 65,10    | 14,70    | 41,20    | 2,60     | 0,20     | 10,90     | 3,60      | 50,00     |
| 38    | 2000 | 84,60    | 126,20   | 91,50    | 114,20   | 31,70    | 40,10    | 36,80    | 44,00    | 23,40    | 1,60      | 1,80      | 67,90     |
| 39    | 2001 | 13,60    | 5,70     | 137,30   | 43,70    | 1,00     | 97,60    | 31,90    | 12,90    | 10,40    | 33,40     | 1,20      | 13,00     |
| 40    | 2002 | 153,70   | 90,50    | 82,00    | 40,50    | 72,30    | 37,50    | 15,80    | 5,00     | 0,90     | 3,00      | 4,90      | 16,90     |
| 41    | 2003 | 51,90    | 43,10    | 82,30    | 53,40    | 33,30    | 25,10    | 5,90     | 23,70    | 0,30     | 0,60      | 0,30      | 0,90      |

Fonte: Planilha Hidro (2020)

### 3.3 Cenários de simulação

As definições dos cenários de simulação seguirão alguns critérios, dentre eles respeitar valores próximos da vazão outorgável do reservatório de Boqueirão que é, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), de  $1,85 \text{ m}^3/\text{s}$ ; não superar o valor de  $2,45 \text{ m}^3/\text{s}$  (valor que, acrescido de uma má gestão de águas, gerou a maior crise da história de Boqueirão); promover políticas de redução que impossibilitem o colapso do reservatório; possibilitar as menores reduções de oferta de água para população a longo prazo.

Atualmente, a maior usuária de água do reservatório de Boqueirão é a CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba), fazendo uso desta água para abastecimento de diversas cidades da Paraíba. Segundo dados da CAGEPA, a vazão média outorgada desde 2014 é de  $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Considerando que desta vazão total cerca de 38% (SNIS, 2019) desta água é desperdiçada devido a vazamentos e falta de manutenção nos sistemas adutores, os consumidores recebem aproximadamente  $0,93 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Os níveis de alerta são parâmetros fixos ou variáveis utilizados em reservatórios com o intuito de se ter uma noção do volume de água disponível para consumo. Para cada nível atingido, atribui-se uma situação específica, onde quanto menor o volume armazenado, mais restrito será o atendimento.

São definidos por diversos estudos e simulações de modo à proporcionar uma menor escassez de oferta para a população, assim como evitar o esgotamento do reservatório em períodos de baixa afluência. No método da simulação e no presente trabalho estes níveis, assim como seus respectivos coeficientes de demanda, serão determinados através do método iterativo, baseados num valor de vazão demandada definido a priori.

Além da avaliação dos 41 anos hipotéticos de dados históricos, será feita uma análise dos 30 meses posteriores a aplicação de um determinado cenário, que utilizarão as mesmas vazões afluentes (médias mensais). Esta simulação de balanço hídrico é indispensável para que o gestor possa ter uma ferramenta de gerenciamento para qualquer política específica escolhida, sabendo sua variação e volume mínimo. As simulações serão realizadas considerando o volume do reservatório coletado em setembro, de  $295.275.077 \text{ m}^3$  (AESAs, 2020).

Foram testados múltiplos cenários (aproximadamente 150 cenários diferentes) com parâmetros determinados pelo método iterativo, combinando vazão demandada, níveis de alerta e coeficientes de demanda. Foi fixado um valor de vazão demandada (seguindo os critérios citados anteriormente) e a partir deste valor, testadas diferentes configurações de níveis de alerta e respectivos coeficientes de restrição. Do total de cenários simulados, foram selecionados cinco a serem demonstrados e discutidos.

### 3.3.1 Cenário I

Considerando o volume do reservatório de  $295.275.077m^3$ , foi utilizada como vazão demandada o valor "máximo permitido" pela ANA de  $1,85m^3/s$ , valor este apenas utilizado quando a capacidade do reservatório não atingir nenhum nível de alerta. Os níveis de alerta, desta forma, foram de  $NA_1 = 75\%$ ,  $NA_2 = 50\%$  e  $NA_3 = 25\%$ , e para cada nível de alerta atingido, um coeficiente de demanda de 0,80, 0,60 e 0,40 será aplicado, respectivamente.

Vale ressaltar que o valor inicial da simulação, como coletado em setembro, já se encaixa na zona de alerta 1 (abaixo de  $308.764.715m^3$ ), a vazão ofertada já sofreu uma redução de 20%, resultando em uma vazão de  $1,48m^3/s$ .

Figura 11 – Níveis de Alerta para Cenário I

| Zona de transbordamento |  |   |
|-------------------------|--|---|
| Zona de Conservação     |  | 411.686.287<br>Demanda atendida<br>100% da desejada |
| Zona de alerta 1        |  | 308.764.715<br>Demanda atendida<br>80% da desejada  |
| Zona de alerta 2        |  | 205.843.143<br>Demanda atendida<br>60% da desejada  |
| Zona de alerta 3        |  | 102.921.572<br>Demanda atendida<br>40% da desejada  |
| Vol. morto              |  | 54.453.579  |

Fonte: Planilha Hidro (2020)

### 3.3.2 Cenário II

O cenário II foi simulado com uma vazão demandada maior e diferentes restrições aplicadas. Nesta hipótese foi utilizado um valor de  $2,00m^3/s$ , valor um pouco acima do recomendado pela ANA, mas que pode ser de grande utilidade em estações chuvosas para regularização. Este valor apenas será utilizado quando a capacidade do reservatório não atingir nenhum nível de alerta. Os níveis de alerta nesta simulação foram definidos como  $NA_1 = 60\%$ ,  $NA_2 = 45\%$  e  $NA_3 = 30\%$ , e para cada nível de alerta atingido, um coeficiente de demanda de 0,75, 0,60 e 0,45, respectivamente.

Nesta situação, o valor inicial se encontra na zona de conservação do reservatório, ou seja, não se encaixa em nenhuma zona de alerta (acima de  $247.011.772m^3$ ), não havendo nenhuma redução na oferta de vazão a priori.

### 3.3.3 Cenário III

Sob ótica similar do cenário anterior apresentado, este cenário foi simulado com vazão demandada de  $1,75m^3/s$ , valor um pouco inferior ao apresentado no cenário anterior

Figura 12 – Níveis de Alerta para Cenário II

| Zona de transbordamento |   |
|-------------------------|---|
| Zona de Conservação     | 411.686.287<br>Demanda atendida<br>100% da desejada |
| Zona de alerta 1        | 247.011.772<br>Demanda atendida<br>75% da desejada  |
| Zona de alerta 2        | 185.258.829<br>Demanda atendida<br>60% da desejada  |
| Zona de alerta 3        | 123.505.886<br>Demanda atendida<br>45% da desejada  |
| Vol. morto              | 54.453.579  |

Fonte: Planilha Hidro (2020)

mas que sofrerá menos redução conforme cada nível de alerta atingido, que nesta simulação foram definidos como  $NA_1 = 80\%$ ,  $NA_2 = 70\%$  e  $NA_3 = 60\%$ , com coeficientes de demanda de 0,90, 0,70 e 0,50, respectivamente.

Novamente, o volume inicial simulado já se encontrava na zona de alerta 1 (entre níveis de alerta 1 e 2), ou seja, a vazão demandada foi multiplicada pelo coeficiente de demanda do  $NA_1$ , resultando num valor de  $1,57m^3/s$ .

Figura 13 – Níveis de Alerta para Cenário III

| Zona de transbordamento |   |
|-------------------------|---|
| Zona de Conservação     | 411.686.287<br>Demanda atendida<br>100% da desejada |
| Zona de alerta 1        | 329.349.029<br>Demanda atendida<br>90% da desejada  |
| Zona de alerta 2        | 288.180.401<br>Demanda atendida<br>70% da desejada  |
| Zona de alerta 3        | 247.011.772<br>Demanda atendida<br>50% da desejada  |
| Vol. morto              | 54.453.579  |

Fonte: Planilha Hidro (2020)

### 3.3.4 Cenário IV

Considerando o volume inicial do reservatório de  $295.275.077m^3$  na simulação, utilizou-se uma vazão demandada de  $2,25m^3/s$ , este apenas utilizado quando a capacidade do reservatório não atingir nenhum nível de alerta. Para cada nível de alerta atingido foi aplicado uma redução rígida na demanda de água ofertada à população, sendo os níveis de alerta de  $NA_1 = 75\%$ ,  $NA_2 = 60\%$  e  $NA_3 = 45\%$ , e coeficientes de demanda de 0,70, 0,55 e 0,40, respectivamente.

Uma observação pertinente para este cenário é que, apesar de apresentar um valor inicial de demanda elevado, no início da simulação ele já se encontra na zona de alerta 1 (entre níveis 1 e 2), sofrendo redução de 30% no seu valor, totalizando uma vazão de  $1,58m^3/s$ .

Figura 14 – Níveis de Alerta para Cenário IV

| Zona de transbordamento |   |
|-------------------------|---|
| Zona de Conservação     | 411.686.287<br>Demanda atendida<br>100% da desejada |
| Zona de alerta 1        | 308.764.715<br>Demanda atendida<br>70% da desejada  |
| Zona de alerta 2        | 247.011.772<br>Demanda atendida<br>55% da desejada  |
| Zona de alerta 3        | 185.258.829<br>Demanda atendida<br>40% da desejada  |
| Vol. morto              | 54.453.579  |

Fonte: Planilha Hidro (2020)

### 3.3.5 Cenário V

Neste cenário foi experimentado uma vazão limítrofe em relação aos valores recomendados por agências nacionais, e, quanto a sua política de restrição, buscou-se simular uma política o menos inicialmente restritiva possível. Este cenário se aproxima das políticas que geraram o quase colapso do Reservatório de Boqueirão entre os anos de 2012 e 2017 (NUNES, 2015). A vazão demandada para esta simulação foi de  $1,90m^3/s$ , e os níveis de alerta foram de  $NA_1 = 50\%$ ,  $NA_2 = 40\%$  e  $NA_3 = 30\%$ , com coeficientes de demanda de 0,70, 0,45 e 0,20, respectivamente.

Figura 15 – Níveis de Alerta para Cenário V

| Zona de transbordamento |   |
|-------------------------|---|
| Zona de Conservação     | 411.686.287<br>Demanda atendida<br>100% da desejada |
| Zona de alerta 1        | 205.843.143<br>Demanda atendida<br>70% da desejada  |
| Zona de alerta 2        | 164.674.515<br>Demanda atendida<br>45% da desejada  |
| Zona de alerta 3        | 123.505.886<br>Demanda atendida<br>20% da desejada  |
| Vol. morto              | 54.453.579  |

Fonte: Planilha Hidro (2020)

### 3.3.6 Resumo dos cenários simulados

No quadro a seguir, encontram-se resumidamente todos os parâmetros dos cenários simulados resumidos pelos seu valores iniciais de demanda, níveis de alerta e políticas de restrição de demanda para cada nível atingido.

Figura 16 – Resumo das configurações de simulação dos cenários

| Cenário | Vazão demandada | NA1 | Coef.1 | NA2 | Coef.2 | NA3 | Coef.3 |
|---------|-----------------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 1       | 1,85            | 75% | 0,80   | 50% | 0,60   | 25% | 0,40   |
| 2       | 2,00            | 60% | 0,75   | 45% | 0,60   | 30% | 0,45   |
| 3       | 1,75            | 80% | 0,90   | 70% | 0,70   | 60% | 0,50   |
| 4       | 2,25            | 75% | 0,70   | 60% | 0,55   | 45% | 0,40   |
| 5       | 1,90            | 50% | 0,70   | 40% | 0,45   | 30% | 0,20   |

Fonte: Autor

## 4 Resultados

### 4.1 Resultados das simulações

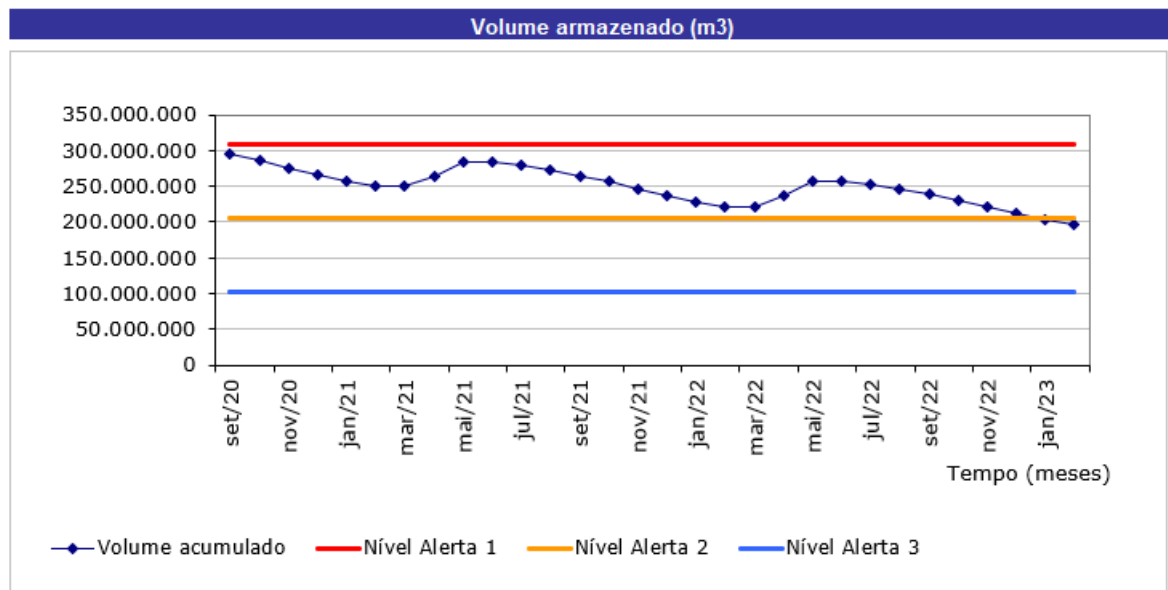
#### 4.1.1 Cenário I

Tabela 2 – Configurações de simulação do cenário I

|            | Volume (%) | Coef. restrição | Vazão final ( $m^3/s$ ) |
|------------|------------|-----------------|-------------------------|
| <b>ZC</b>  | 100        | 1               | 1,85                    |
| <b>NA1</b> | 75         | 0,8             | 1,48                    |
| <b>NA2</b> | 50         | 0,6             | 1,11                    |
| <b>NA3</b> | 25         | 0,4             | 0,74                    |

Dos 492 meses simulados hipoteticamente, apenas 3 meses apresentaram falhas (ou 0,6%), sendo estes 3 meses consecutivos. Considerando o gerenciamento futuro do reservatório, ou seja, os meses a seguir de setembro de 2020 (até fevereiro de 2023) não houve falhas no sistema, apenas reduções na oferta para os consumidores, pois o reservatório saiu do nível de alerta 1 para o 2, havendo redução de 40% na oferta nesta última, o que implica em uma vazão fornecida de  $1,11 m^3/s$ .

Figura 17 – Resultado da simulação para Cenário I



Fonte: Planilha Hidro (2020)

No período de setembro de 2020 até fevereiro de 2023, o volume mínimo observado foi de  $197.134.069 m^3$  (67% do valor inicial), sendo menor que o valor inicial simulado e

permanecendo na zona de alerta 1 por quase todos os meses, atingindo o segundo nível nos últimos. Uma breve análise gráfica deste resultado indicaria que as zonas de alerta, juntamente com a demanda aplicada nestas se mostraram equilibradas, pois na situação simulada os níveis do reservatório se mantiveram quase integralmente na zona de alerta 1.

Por ter níveis de alerta bastante afastados entre si e políticas de restrição iniciando-se a 75% do volume total do reservatório, este cenário se mostrou mais aplicável a anos escassos do que chuvosos. Com restrições aplicadas no início da simulação, houve uma queda equilibrada do volume do reservatório. Desta forma, ao atingir o nível de alerta 2 e sob uma restrição de 40% da demanda total, o reservatório teria maior folga para recuperar sua capacidade total.



## 4.1.2 Cenário II

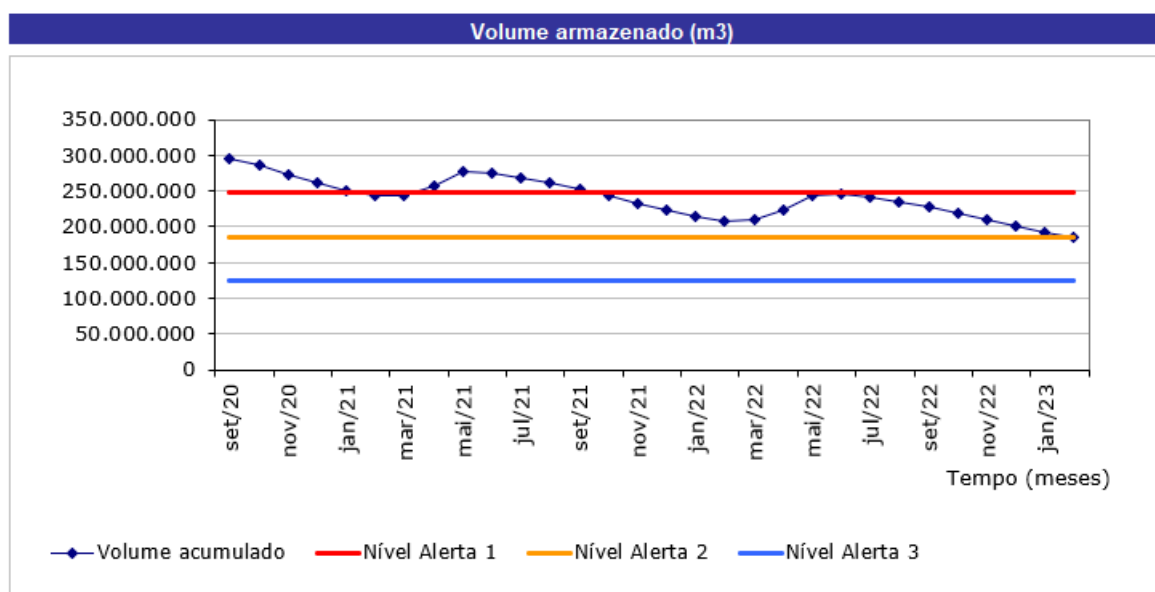
Tabela 3 – Configurações de simulação do cenário II

|            | Volume (%) | Coef. restrição | Vazão final ( $m^3/s$ ) |
|------------|------------|-----------------|-------------------------|
| <b>ZC</b>  | 100        | 1               | 2,00                    |
| <b>NA1</b> | 60         | 0,75            | 1,50                    |
| <b>NA2</b> | 45         | 0,60            | 1,20                    |
| <b>NA3</b> | 30         | 0,45            | 0,90                    |

Nesta simulação, os resultados apontam falha no abastecimento em 7 meses do total de 492 meses (ou 1,4%). As falhas ocorreram em 6 meses consecutivos e um não. Quanto ao gerenciamento futuro do reservatório, esta política sendo aplicada não haveriam falhas até fevereiro de 2023, apenas restrições na oferta para os consumidores.

O reservatório que inicialmente se encontraria na zona de conservação definida, ficaria na iminência de chegar à zona de alerta 2, como mostra o gráfico a seguir. Nesta zona de alerta, a vazão demandada seria restringida a  $1,20m^3/s$ , até que a capacidade do reservatório voltasse a zona de alerta 1 ou de conservação. O volume mínimo nesta situação foi de  $185.604.864m^3$ , ou seja, 63% do valor inicial simulado.

Figura 18 – Resultado da simulação para Cenário II



Fonte: Planilha Hidro (2020)

Uma análise baseada nos resultados postos como gráfico é a de que o nível de alerta 1 poderia estar acima, iniciando políticas de restrição de demanda antes de maiores quedas de volume, pois os níveis na zona de conservação decaíram rapidamente, mesmo havendo afluências nos períodos observados. Conforme o reservatório atingiu a zona de alerta 1, o volume do reservatório não sofreu grandes variações até o final da simulação. Devido aos níveis de alerta apresentados, este cenário mostra-se mais aplicável a anos chuvosos.

### 4.1.3 Cenário III

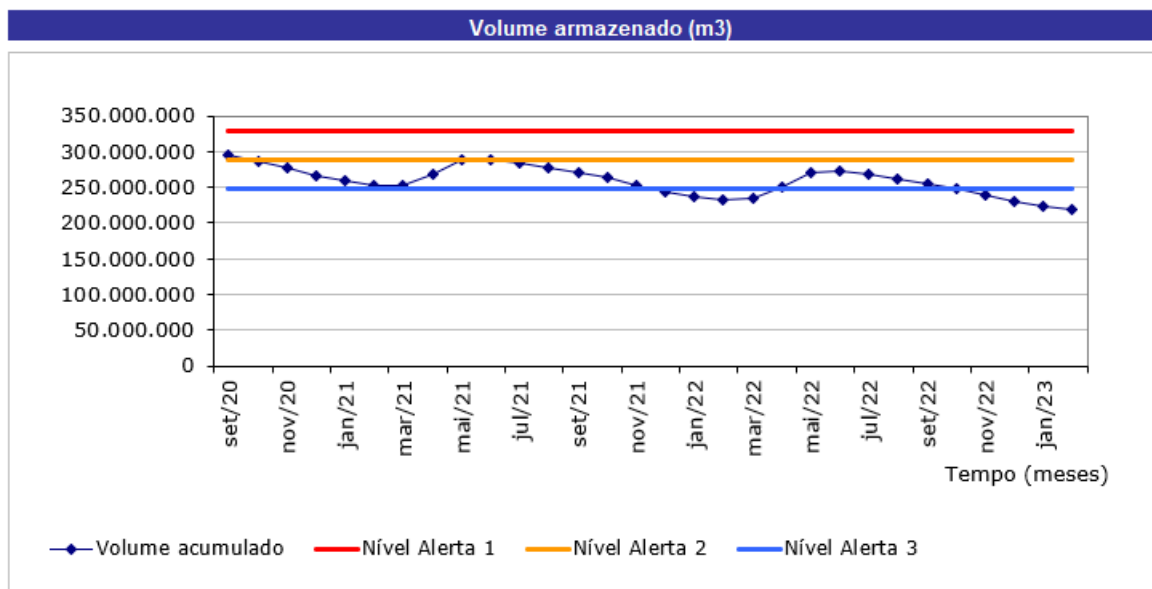
Tabela 4 – Configurações de simulação do cenário III

|            | Volume (%) | Coef. restrição | Vazão final ( $m^3/s$ ) |
|------------|------------|-----------------|-------------------------|
| <b>ZC</b>  | 100        | 1               | 1,75                    |
| <b>NA1</b> | 80         | 0,75            | 1,31                    |
| <b>NA2</b> | 70         | 0,60            | 1,05                    |
| <b>NA3</b> | 60         | 0,45            | 0,79                    |

Nesta simulação, para o volume inicial, a demanda já foi iniciada sofrendo políticas de redução do segundo nível de alerta (60% da vazão demandada) tendo seu valor reduzido a  $1,05 m^3/s$ . Como resultado da simulação, obteve-se 1 falha em 492 meses (ou em 0,2% dos meses).

Ao aplicar essa política de gerenciamento para anos futuros, o volume do reservatório continuamente oscilou entre os níveis 2 e 3 o que não se configurou como um problema por si só, haja vista que nessa simulação, os níveis de alerta foram propositalmente simulados com valores de volumes percentuais maiores. O volume mínimo observado foi de  $218.201.422m^3$ , o que equivale a 53% da capacidade total do reservatório simulado.

Figura 19 – Resultado da simulação para Cenário III



Fonte: Planilha Hidro (2020)

Analisando graficamente os resultados deste cenário, pode-se questionar a aplicação de níveis de alerta muito próximos. A simulação inicia-se na zona de alerta 1, descendo rapidamente a 2ª zona e quase atingindo a 3ª, esta só realmente atingida próximo aos meses de novembro a dezembro de 2021. Em períodos de baixa afluência, mesmo com reduções de demanda, os níveis do reservatório podem decair muito acentuadamente, além de não ser prático aos gestores de água alterar a demanda em curtos períodos de tempo.

## 4.1.4 Cenário IV

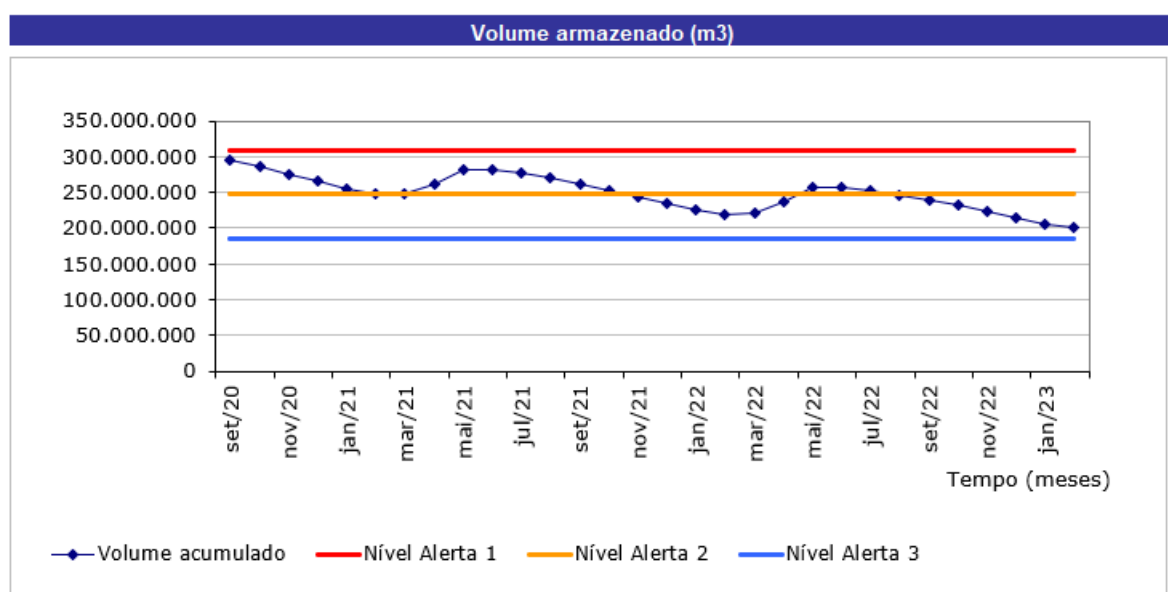
Tabela 5 – Configurações de simulação do cenário IV

|            | Volume (%) | Coef. restrição | Vazão final ( $m^3/s$ ) |
|------------|------------|-----------------|-------------------------|
| <b>ZC</b>  | 100        | 1               | 2,25                    |
| <b>NA1</b> | 75         | 0,70            | 1,58                    |
| <b>NA2</b> | 60         | 0,55            | 1,24                    |
| <b>NA3</b> | 45         | 0,40            | 0,90                    |

Dos 492 meses simulados, 19 meses apresentaram falhas (ou 3,9% destes). As falhas não ocorreram em meses individuais, mas sim em 5 blocos de falhas de 2 até 7 meses consecutivos, sendo o maior bloco entre os meses de junho e dezembro, meses que não estão incluídos na estação chuvosa anual. Ao aplicar essa política em gerenciamento futuro do reservatório, nos meses setembro de 2020 até fevereiro de 2023, não foram encontradas falhas no sistema de abastecimento, mas houve severas reduções na oferta de água para consumo.

O reservatório, que inicialmente se encontrava com volume de  $295.275.077m^3$  (zona de alerta 1 da simulação) teve seu volume decaído até atingir a zona de alerta 2 em novembro de 2021, e mesmo com grande afluência nos meses posteriores e reduções na demanda de água (redução de 45% na vazão), continuou a decair até quase atingir o nível de alerta 3 nos últimos meses de simulação. O volume mínimo observado foi de  $199.985.308m^3$  (49% da capacidade total), sendo menor que o valor inicial simulado em cerca de 100 MCM (milhões de metros cúbicos) num período de 30 meses.

Figura 20 – Resultado da simulação para Cenário IV



Fonte: Planilha Hidro (2020)

Neste resultado, observou-se uma certa tendência do volume do reservatório em se manter próximo ao nível de alerta 2, oscilando entre as duas zonas ao redor desta reta. Uma breve explicação para essa tendência seria a de que a política restritiva na zona de alerta 1 não foi tão rígida quanto na zona de alerta 2 e, desta forma, o volume do reservatório tende a cair rapidamente da 1ª zona e recuperar-se na 2ª, que apresenta uma menor saída de água para consumo.

## 4.1.5 Cenário V

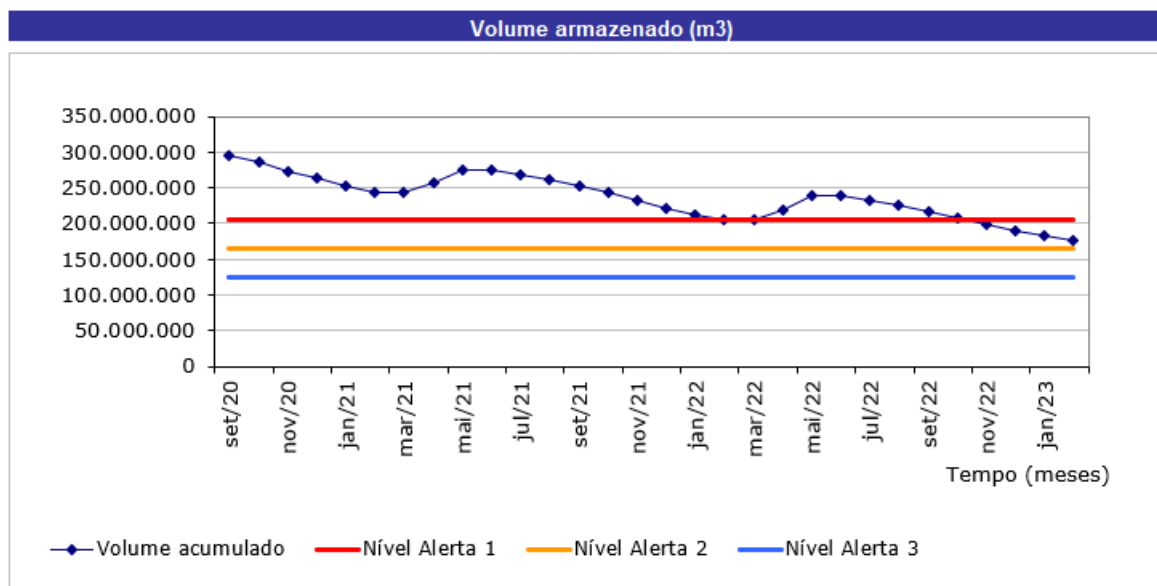
Tabela 6 – Configurações de simulação do cenário V

|            | Volume (%) | Coef. restrição | Vazão final ( $m^3/s$ ) |
|------------|------------|-----------------|-------------------------|
| <b>ZC</b>  | 100        | 1               | 1,90                    |
| <b>NA1</b> | 50         | 0,70            | 1,33                    |
| <b>NA2</b> | 40         | 0,45            | 0,86                    |
| <b>NA3</b> | 30         | 0,20            | 0,38                    |

Na simulação, considerando o volume inicial, a demanda não foi iniciada com reduções nas vazões devido aos coeficientes de demanda, pois constava na zona de conservação do reservatório. Como resultado, obteve-se 5 falhas (escassez) em 492 meses (1,0%), sendo 5 meses consecutivos.

Sobre o gerenciamento para anos futuros, observou-se que o volume do reservatório no período de avaliação do cenário decaiu consideravelmente da zona de conservação, até atingir o nível de alerta 1 e voltar a zona inicial devido a alta afluência do período (entre os meses de fevereiro e maio). Após este breve período de afluência, o nível decaiu novamente, encerrando a simulação na zona de alerta 1, em iminência de atingir o nível de alerta 2. O volume mínimo observado foi de  $176.825.491m^3$ , ou 43% da capacidade total do reservatório.

Figura 21 – Resultado da simulação para Cenário V



Fonte: Planilha Hidro (2020)

O resultado deste cenário se assemelha ao do cenário II anteriormente apresentado. Observa-se que mesmo sem os níveis de alerta presentes no início da simulação, o reservatório é capaz de se recuperar em períodos de afluência sem restrições na demanda de água.

Dessa forma, as políticas utilizadas neste cenário jamais poderiam ser aplicadas em anos secos, mas sim em anos chuvosos, onde há grande recarga hídrica na bacia e uma maior demanda poderia evitar perdas por transbordamento e por evaporação, devido a um maior espelho de água.

## 4.2 Análise dos resultados via critérios de performance

Conforme critérios de *Hashimoto* apresentados na seção 2.4 (medidas de performance do sistema), analisa-se os cenários apresentados nesta seção a partir da confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, além dos respectivos volumes mínimos de cada cenário simulado.

### 4.2.1 Confiabilidade

Para cada cenário calculado, obtém-se um valor de confiabilidade ( $\alpha$ ) através do item indicado na seção anterior. Os resultados de confiabilidade para cada cenário se encontram na tabela a seguir.

Tabela 7 – Confiabilidades para cada cenário simulado.

| #####    | Cenário I | Cenário II | Cenário III | Cenário IV | Cenário V |
|----------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|
| $\alpha$ | 0,993902  | 0,985772   | 0,997967    | 0,997967   | 0,989837  |

### 4.2.2 Resiliência

Repetindo o procedimento da subseção anterior e calculando os valores de resiliência ( $\gamma$ ), obtém-se a tabela a seguir.

Tabela 8 – Resiliências para cada cenário simulado.

| #####    | Cenário I | Cenário II | Cenário III | Cenário IV | Cenário V |
|----------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|
| $\gamma$ | 0,333334  | 0,285714   | 1,000000    | 0,263158   | 0,200000  |

Apenas o cenário III apresentou um valor considerado perfeito de resiliência, pois ocorreu uma única falha no sistema, o que implica um único grupo de falhas.

### 4.2.3 Vulnerabilidade

Para os valores de vulnerabilidade dos cenários em estudo, foram obtidos os valores da tabela a seguir.

Tabela 9 – Vulnerabilidades para cada cenário simulado.

| ##### | Cenário I | Cenário II | Cenário III | Cenário IV | Cenário V |
|-------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|
| $v$   | 0,40      | 0,45       | 0,50        | 0,40       | 0,20      |

Como este indicador é calculado pela porcentagem da demanda quando ocorreu a falha versus o número de meses onde ocorreram essa falha, sobre o total de meses com

falhas, este indicador pode ser calculado pelo último valor de coeficiente de demanda (nível de alerta 3), pois este é o último valor a ser adotado antes de se atingir a falha (volume morto).

#### 4.2.4 Volumes mínimos

Ainda como critério de análise de performance dos sistemas simulados, buscou-se avaliar os volumes mínimos após a aplicação e gerenciamento de cada cenário proposto por 30 meses seguintes (setembro de 2020 até janeiro de 2023), com o mesmo valor de volume inicial coletado no mês inicial.

Tabela 10 – Volumes mínimos dos cenários em 30 meses de gerenciamento.

| #####              | Vol. Mín. ( $m^3$ ) |
|--------------------|---------------------|
| <b>Cenário I</b>   | 197.134.069         |
| <b>Cenário II</b>  | 185.604.864         |
| <b>Cenário III</b> | 218.201.422         |
| <b>Cenário IV</b>  | 199.985.308         |
| <b>Cenário V</b>   | 176.825.491         |

#### 4.2.5 Resumo dos indicadores dos cenários

A tabela a seguir apresenta os resultados finais de todos os cenários e seus respectivos indicadores.

Tabela 11 – Resumo de todos os indicadores avaliativos dos cenários.

|             | $\alpha$ | $\gamma$ | $v$  | Vol. Mín. ( $m^3$ ) |
|-------------|----------|----------|------|---------------------|
| Cenário I   | 0,993902 | 0,333334 | 0,40 | 197.134.069         |
| Cenário II  | 0,985772 | 0,285714 | 0,45 | 185.604.864         |
| Cenário III | 0,997967 | 1,000000 | 0,50 | 218.201.422         |
| Cenário IV  | 0,997967 | 0,263158 | 0,40 | 199.985.308         |
| Cenário V   | 0,989837 | 0,200000 | 0,20 | 176.825.491         |



Como apresentado nas seções anteriores, cada indicador representado na tabela 11 é um importante parâmetro para a gestão de um sistema de abastecimento de água. A confiabilidade é um indicativo de o quanto o sistema pode atender a uma determinada demanda de água em todo horizonte de tempo analisado, ou seja, a probabilidade de que não hajam falhas no atendimento.

Desta forma, o cenário que apresentar este valor mais próximo de 1 implica em um sistema onde haveriam poucas falhas. Dificilmente haverá um cenário de confiabilidade 100% numa região de alta incerteza no regime pluviométrico, sem haver deficiência na oferta de água para a população, portanto, faz-se necessário avaliar outros parâmetros, como a resiliência, que indica a velocidade de recuperação do sistema, a partir de uma determinada falha no mesmo.

Pode-se avaliar a resiliência de um sistema observando a razão da quantidade de grupos de falhas no atendimento da demanda em relação a quantidade total de falhas. Naturalmente, busca-se obter um sistema onde a resiliência é próxima de 1, ou seja, onde a falha ocorra em um único grupo de falhas. Isso implica que, após este grupo de falhas, o sistema se recupere totalmente. Todavia, existe a possibilidade de haver uma falha muito prejudicial ao sistema, determinada pela vulnerabilidade do mesmo.

Conforme tabela 11, pode-se observar que os cenários apresentaram resultados bastante próximos quanto suas confiabilidades, atingindo quase o valor máximo em todas as simulações. Na resiliência, apenas o cenário III apresentou resultado excelente, sendo considerado como cenário totalmente resiliente, enquanto os demais ficaram mais próximos de resultados nada resilientes (próximos de zero).

Todavia, o cenário III não apresentou resultado satisfatório quanto sua vulnerabilidade, sendo o mais vulnerável entre os demais. A cerca do volume final dos cenários simulados, observou-se valores próximos de 200 MCM, flutuando ao redor desta média, aonde o cenário III apresentou o maior volume mínimo entre os demais e o cenário V, o menor.



## 5 Conclusão

De acordo com a metodologia exposta e a apresentação e análise dos resultados apresentadas nas seções anteriores, pode-se concluir alguns pontos relevantes à discussão:

1. Não existe política ideal para a operação de reservatórios. Existem, sim, políticas que otimizam o uso da água armazenada em anos chuvosos e que aumentem a confiabilidade em anos escassos, por apresentar coeficientes de redução de demanda;
2. Corroborando com o item anterior e conforme visto no resultado das simulações, é necessário analisar uma política de gerenciamento através de diversos pontos, nesse trabalho, apresentados através dos indicadores de *Hashimoto*. Este procedimento é necessário pois um cenário com maior confiabilidade ainda pode ser menos resiliente ou sofrer mais danos com as falhas no abastecimento (sendo mais vulnerável).
3. Não obstante, o volume mínimo no armazenamento em todo o período após a aplicação da política também se mostrou um indicador de grande importância. Através deste indicador o gestor pode observar, em anos chuvosos ou de escassez, o ponto mais crítico em todo o espaço de tempo em que a política foi aplicada. Por exemplo, se este ponto crítico ocorre em meio a estações chuvosas, isto pode indicar que a vazão de retirada está muito além da capacidade de recarga do reservatório.
4. Além dos indicadores qualitativos, fez-se essencial conhecer os aspectos hidrológicos e culturais da região em estudo, além de políticas anteriores. O reservatório em estudo está situado em uma região de clima tipicamente semiárido, de baixa média de precipitações anuais e ainda susceptível a perdas consideráveis por evaporação, devido às temperaturas elevadas. Estes fatores induzem à ter-se reduções mais rígidas na oferta de água ao atingir níveis mais baixos do reservatório e, conseqüentemente, maiores vazões retiradas em níveis mais altos, evitando maiores perdas por evaporação.
5. A aplicação de níveis de alerta e coeficientes de redução de demanda trazem um maior controle no gerenciamento do volume de um reservatório. Ao manter este volume em níveis equilibrados, pode-se priorizar fornecer quantidade de água suficiente para o abastecimento público, indústria e atividades agropecuárias, além da irrigação e dessedentação animal, estas duas últimas podendo ser suspensas temporariamente caso a capacidade do reservatório se aproxime do esgotamento.
6. Aliada a uma política efetiva de gestão de recursos hídricos, é fundamental promover a conscientização da população de que a água é um recurso essencial e pode se tornar extremamente escassa em regiões que sofrem com séries de anos de seca.



# Referências

- [1] AESA - Comitê de Bacias: Apresentação - Rio Paraíba. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/comite-de-bacias/rio-paraiba/>> Acesso em 26/09/2019.
- [2] AESA - Balanço das disponibilidades dos reservatórios e demandas hídricas estabelecidas para o cenário tendencial (2016). Disponível em: <[http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/PE\\_45.pdf](http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/PE_45.pdf)>. Acessado em: 17/10/19.
- [3] AESA - Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado da Paraíba (2008-2009). SEMARHCT - Governo da Paraíba.
- [4] BEZERRA et al. Resposta espectral e qualidade da água do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão-PB). In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC, 2018. Alagoas.
- [5] CHAVES, Paulo Henrique dos Santos. Stochastic reservoir operation for water quantity and quality using artificial intelligence technologies. 2005. 132f. Tese de Doutorado - Kyoto University.
- [6] COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Editora ABRH. 2015.
- [7] LUCENA, Dátia Paula Marques Maia. Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região. 2018. 94f. Dissertação de Mestrado - PPGECA - Universidade Federal de Campina Grande.
- [8] DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Açude Boqueirão de Cabaceiras - Barragem Epitácio Pessoa. <<https://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>>. Acesso em 16/09/2019.
- [9] GALVÃO, C. O., OLIVEIRA, K. F.. 2004. Operação e Manutenção de Açudes. Universidade Federal de Campina Grande/UNESCO. Campina Grande, Brasil, 2004.
- [10] GALVÃO, C. O., RABBANI, E.R., RIBEIRO, M.M.R.. 1994. Otimização do uso da água em reservatórios no semi-árido através de programação dinâmica. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2, 1994, Fortaleza: ABRH p. 469-469.
- [11] HASHIMOTO, T., LOUCKS, D. P. & STEDINGER, J. (1982). Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. Water Resour. Res.18(1), 14-20.
- [12] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas.

- <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 26/09/2019.
- [13] LOUCKS, Daniel P.; van Beek, Eelco (2017). *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Deltares, UNESCO-IHE, Springer.
- [14] NOHARA, D., HORI, T., & SATO, Y. (2018). Real-Time Reservoir Operation for Drought Management Considering Operational Ensemble Predictions of Precipitation in Japan. *Advances in Hydroinformatics. SIMHYDRO2014*, 333-347.
- [15] NOHARA, D., MIKI, H. & HORI, T (2011). Long-term Reservoir Operation Considering Large-scale Meteorological Conditions Well-correlated with Basin Precipitation. *Disaster Prevention Research Institute - Kyoto University*.
- [16] NUNES, Tereza Helena Costa. *A gestão do reservatório Epitácio Pessoa e regras de operação otimizadas*. 2015. 75f. Dissertação de Mestrado - PPGECA Universidade Federal de Campina Grande.
- [17] OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. J. V. *Estimativa da Evaporação e Análise do Uso do Coeficiente (Kp) do Tanque "CLASSE A" nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2005.
- [18] Projeto UniCampo. *O Cariri paraibano*. Universidade Federal de Campina Grande. Disponível em: <[http://www.ufcg.edu.br/~unicampo/o\\_cariri.htm](http://www.ufcg.edu.br/~unicampo/o_cariri.htm)> Acesso em 26/09/2019.
- [19] RÊGO, J.C.; GALVÃO, C.O.; ALBUQUERQUE, J.P.T.; RIBEIRO, M.M.R.; NUNES, T.H.C. (2017) *A Gestão de recursos hídricos e a transposição de águas do rio São Francisco para o açude Epitácio Pessoa - Boqueirão*. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017*. Anais. Porto Alegre: ABRH.
- [20] SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 2018 - *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto*. Brasília, 2019.
- [21] UFPB/MMA. *Unidade de Planejamento UP12: Bacias Hidrográficas dos Rios Paraíba, Mamanguape e Miriri*. João Pessoa: UFPB/MMA, 1998.
- [22] VIEIRA, Z. M. C. L.; RIBEIRO, M. M. R. *A Gestão de Recursos Hídricos no Estado da Paraíba: Aspectos legais e institucionais (2007)*. In: *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. São Paulo.