



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E
SANITÁRIA**

TEREZA HELENA COSTA NUNES

**A GESTÃO DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA E
REGRAS DE OPERAÇÃO OTIMIZADAS**

CAMPINA GRANDE-PB

2015

TEREZA HELENA COSTA NUNES

**A GESTÃO DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA E
REGRAS DE OPERAÇÃO OTIMIZADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadores: Carlos de Oliveira Galvão

Janiro Costa Rêgo

Campina Grande-PB

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N972g

Nunes, Tereza Helena Costa.

A gestão do reservatório Epitácio Pessoa e regras de operação otimizadas / Tereza Helena Costa Nunes. – Campina Grande, 2015.

74 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2015.

"Orientação: Carlos de Oliveira Galvão, Janiro Costa Rêgo".
Referências.

1. Operação de Reservatórios. 2. Curva-Guia. 3. Semiárido.
4. Outorga. I. Rêgo, Janiro Costa. II. Título.

CDU 627.81(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TEREZA HELENA COSTA NUNES

**A GESTÃO DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA E REGRAS DE
OPERAÇÃO OTIMIZADAS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
(Orientador . Universidade Federal de Campina Grande)

Prof. Dr. Janiro Costa Rêgo
(Coorientador . Universidade Federal de Campina Grande)

Prof^a. Dr^a. Andréa Carla Lima Rodrigues
(Examinadora Interna . Universidade Federal de Campina Grande)

Prof. Dr. Salomão de Sousa Medeiros
(Examinador Externo . Instituto Nacional do Semiárido)

Campina Grande-PB, 31 de agosto de 2015.

Aos meus pais
Teodoro (in memoriam), Saulo (in memoriam) e Socorro
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Ao meu amor, meu maior exemplo, minha mãe, Socorro Costa, por todo amor e amizade, pelos ensinamentos, pela confiança, pelo investimento, pelas orações, jamais serei capaz de lhe retribuir, mas farei o possível.

À minha família, que sempre acreditou e torceu por mim. Especialmente ao meu avô Alexandrino Pedro (in memoriam), que rezava todos os dias por mim, a minha avó Alice, a meu padrinho Paulo Nunes, por todo incentivo e carinho, as minhas tias Rosário, Madalena, Fátima e Maria José, e as minhas primas Lúbia e Débora, pelas orações e pensamentos positivos.

Aos meus orientadores e gurus, Calos Galvão e Janiro Costa, pelo conhecimento transmitido, paciência, apoio, incentivo e puxões de orelha, serei eternamente grata.

A Dyego Lourenço, por todo apoio, carinho, companheirismo, amizade e por acreditar em mim, quando eu mesma duvidava.

A Lúcia de Fátima, pela amizade e incentivo de sempre.

A Urquizza Lee, por me receber com tanta alegria e amor todos os dias, recarregando minhas forças para continuar.

A João Miguel, que em tão pouco tempo trouxe tanta luz e alegria para minha vida.

Aos colegas do mestrado, em especial a Lucivânia Rangel, Pedro Hugo, Lívia Rocha, Antônio Lopes, Artur Moises e Ricardo Pedrosa.

Aos verdadeiros amigos que este mestrado me deu de presente, Bárbara Tsuyuguchi, Karla Azevedo e Tayron Juliano, que trouxeram mais cor a esses dois anos e meio. Sem vocês o mestrado seria menos doce.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA, em especial a Dayse Luna, Márcia Maria, Iana Rufino e Andréa Carla, por todo conhecimento dividido e pelas palavras de incentivo em todos os encontros.

Aos colegas dos Laboratórios de Hidráulica I e II, sobretudo Ismael, Júlio, Haroldo, Eduardo, Valdomiro, Samuel, Marcela, Tafnes, Anna, Tibério, Guilherme, Vera, Aurezinha, Wanessa, Adriana, Hiran, pelas conversas, risadas, cafezinhos e por fazerem eu me sentir em casa.

À Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, pelo fornecimento de dados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Projeto Bramar e ao PPGECA, pelo apoio científico e material à pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico . CNPq, pelo auxílio financeiro através da bolsa de estudos concedida.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e contribuições.

A todos que acreditaram e torceram por mim, muito obrigada.

A GESTÃO DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA E REGRAS DE OPERAÇÃO OTIMIZADAS

RESUMO

Regiões com alta variabilidade hidrológica são, geralmente, abastecidas por reservatórios plurianuais com baixas vazões de regularização, sujeitos, sazonalmente, a grandes vertimentos e a perdas por evaporação em seus períodos de cotas altas. Este trabalho levantou a hipótese do aproveitamento da água vertida e/ou evaporada, em regiões com estas características, para suprir demandas não atendidas pela vazão outorgável dos reservatórios, utilizando uma vazão máxima excedente para incrementar a vazão outorgável. Como caso de estudo, foi efetuada a operação do reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), localizado no semiárido brasileiro, se enquadrando na descrição supracitada. O açude Boqueirão passa pela segunda crise hídrica desde sua construção, tendo como principal responsável, a falta de uma gestão eficiente dos recursos hídricos. Por meio de simulação do balanço hídrico e otimização, foi desenvolvida uma curva-guia para operação do reservatório e encontrada a vazão excedente máxima explorável do reservatório em períodos de cheia. Com os resultados encontrados, pode-se concluir que há a possibilidade de utilizar uma vazão excedente em períodos de grandes aflúncias sem que o abastecimento em períodos de secos seja prejudicado. As ferramentas desenvolvidas neste estudo podem auxiliar na implantação do instrumento outorga. Os resultados podem ser aprimorados com a adição de previsão climática às simulações.

Palavras-chave: Operação de reservatórios, Curva-guia, Semiárido, outorga.

MANAGEMENT OF EPITÁCIO PESSOA RESERVOIR AND OPTIMIZED OPERATION RULES

ABSTRACT

Regions with high hydrological variability are usually supplied by reservoirs that regularize discharges inter-annually, with low discharge of regularization, seasonally subject to large overflow and evaporation losses in their periods of high water levels. The Brazilian semiarid is one of such regions. This work looks at the possibility of using water that would be evaporated and/or overflowed, in regions with such characteristics, to supply demands that would not be otherwise provided by the maximum legally allowed withdrawal discharge. The proposed method was applied to the operation of Epitácio Pessoa (Boqueirão) reservoir, which is experiencing the second water crisis since its construction, caused by the lack of an efficient water resources management. Through simulation of the water budget and optimization, a rule curve was developed for reservoir operation. The results show that it is possible to use the excess water in periods of large inflows with no damage to water supply during dry periods. The tools developed in this study may support the implementation of the instrument related to the concession of water rights. The results can be improved with the addition of the seasonal forecasts to the simulations.

Keyword: Reservoir Operation, Rule Curve, Semiarid, Water Rights.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Estado da Paraíba - Bacias Hidrográficas	19
Figura 2 - Balanço hídrico de um reservatório de água.....	23
Figura 3 - Curvas de garantia para diferentes intervalos de simulação.....	26
Figura 4 - Exemplo de uma curva-guia variável sazonalmente	28
Figura 5 - Localização do reservatório Boqueirão	30
Figura 6 - Fluxograma das etapas metodológicas.....	31
Figura 7 - Série histórica de precipitações na bacia hidrográfica do açude Boqueirão	32
Figura 8 - Série histórica de vazões afluentes ao açude Boqueirão (1963-1983)	33
Figura 9 - Série histórica de vazões afluentes ao açude Boqueirão (2004-2015)	34
Figura 10 - Lâminas médias mensais evaporadas	35
Figura 11 - Representação do balanço hídrico de um reservatório.....	37
Figura 12 - Curva-guia de aproveitamento da vazão excedente.....	42
Figura 13 - Volumes reais armazenados no reservatório Boqueirão de 1998 a 2015	46
Figura 14 - Simulação do balanço hídrico do reservatório Epitácio Pessoa com retiradas outorgadas	49
Figura 15 - Curva de garantia do açude Boqueirão.....	54
Figura 16 - Fotografia de um outdoor na cidade de Campina Grande	56
Figura 17 - Curva-guia calculada para o açude Boqueirão	58
Figura 18 - Curva-guia calculada e curva-guia suavizada adotada para o açude Boqueirão.....	58
Figura 19 - Curva-guia original aplicada à série de 1963 a 1983: níveis e volumes armazenados.....	60
Figura 20 - Curva-guia original aplicada à série de 1963 a 1983: vazões outorgável e excedente máxima	60
Figura 21 - Curva-guia aplicada à série de 1963 a 1983: níveis e volumes armazenados.....	61
Figura 22 - Curva-guia aplicada à série de 1963 a 1983: vazões outorgável e excedente máxima	61
Figura 23 - Curva-guia suavizada aplicada à série de 2004 a 2015: níveis e volumes armazenados.....	63
Figura 24 - Curva-guia suavizada aplicada à série de 2004 a 2015: vazões outorgável e excedente máxima.....	64
Figura 25- Simulação série de 2004 a 2015 com uso da vazão outorgável: níveis e volumes armazenados sem o uso da curva-guia	64
Figura 26 - Série de 2004 a 2015: níveis e volumes armazenados com e sem o uso da curva-guia.....	65
Figura 27 - Curva-guia aplicada à série de 2011 a 2015: níveis e volumes armazenados.....	67
Figura 28 - Curva-guia aplicada à série de 2011 a 2015: vazões outorgável e excedente máxima	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAGISA - Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba

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

ANA - Agência Nacional de Águas

APPs - Áreas de Proteção Permanente

ATECEL - Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior

CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

DSC - Departamento de Sistemas da Computação

FIG - Figura

GRH - Gestão de Recursos Hídricos

LMRS-PB - Laboratório de Metodologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba

MP-PB - Ministério Público do Estado da Paraíba

PERH-PB - Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba

Qem - Vazão Excedente Máxima

Qout - Vazão Outorgável

SAC - sistema adutor do Cariri

SACG - sistema adutor de Campina Grande

SEMARH - Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais da Paraíba

SLOP - Standard Linear Operation Policy

TAB - Tabela

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Gestão de Recursos Hídricos	15
2.2 Recursos hídricos no estado da Paraíba . Legislação	17
2.3 Outorga dos direitos de uso dos Recursos Hídricos	20
2.4 Operação de Reservatórios	21
2.5 Vazão de Regularização	25
2.6 Curva de Garantia.....	25
2.7 Curva-Guia.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Caso de Estudo.....	29
3.2 Séries de dados	32
3.2.1 Precipitações	32
3.2.2 Vazões afluentes	32
3.2.3 Evaporação.....	34
3.2.4 Curva cota-área-volume	35
3.3 A simulação do balanço hídrico	37
3.3.1 Componentes do modelo.....	38
3.3.2 Planilhas do Hidro.....	39
3.4 Curva de garantia.....	40
3.5 O estabelecimento da Curva-guia.....	40
4 ANÁLISE DA GESTÃO DO RESERVATÓRIO BOQUEIRÃO.....	43
4.1 Principais usuários do reservatório Boqueirão	43
4.1.1 Companhia de Água e Esgotos da Paraíba.....	43
4.1.2 Irrigação.....	43
4.2 A gestão do açude Boqueirão.....	45
4.3 Últimos acontecimentos.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1 Curva-guia calculada e suavizada	57
5.2 Aplicações da Curva-guia a série de 1963 a 1983.....	59
5.3 Aplicações da Curva-guia a série de 2004 a 2015.....	62
5 CONCLUSÕES	69
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

Demandas de água em bacias hidrográficas com alta variabilidade hidrológica, quando atendidas por mananciais superficiais, necessitam de reservatórios com regularização plurianual. Tais reservatórios são construídos com grande capacidade de armazenamento, todavia suas vazões de regularização e, conseqüentemente, suas vazões outorgáveis costumam ser baixas, quando comparadas a valores referentes a reservatórios em bacias de menor variabilidade (estes últimos, por apresentarem recargas regulares todos os anos, têm seus planejamentos de uso da água efetuados para o ano da recarga: variabilidade intra-anual).

Em decorrência das pequenas vazões outorgáveis, os reservatórios plurianuais sofrem sazonalmente grandes vertimentos e perdas por evaporação em seus períodos de cheia e altas cotas. Questiona-se, então, se os volumes vertidos e evaporados nesses períodos poderiam ser utilizados total ou parcialmente para suprir demandas não atendidas pela vazão outorgável (MACHADO et al., 2012; LIMA et al., 2005; SILVA e MONTEIRO, 2004; RIBEIRO e LANNA, 2003).

O semiárido brasileiro está entre as regiões de acentuada variabilidade hidrológica (interanual). Nele, a gestão dos recursos hídricos é extremamente complexa, especialmente devido às condições climáticas extremas, como altas taxas de evaporação e precipitações irregulares no tempo e no espaço. Esta região costuma apresentar ciclos caracterizados por sucessivos anos de escassez hídrica, intercalados por sucessivos anos de altas precipitações, o que traz incertezas em relação às recargas dos anos vindouros, de modo que o gestor é induzido a manter a cautela quando da concessão da outorga pelo uso da água do reservatório (STUDART e CAMPOS, 2001). Tais peculiaridades geram, comumente, incompatibilidade entre oferta e demanda e, conseqüentemente, conflitos de uso/interesse entre seus múltiplos usuários ou usos (abastecimento urbano, dessedentação animal, irrigação, piscicultura, etc.).

O reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), localizado na parte semiárida da bacia hidrográfica do rio Paraíba, se enquadra como reservatório plurianual descrito. A utilização da água de Boqueirão tem gerado conflitos, uma vez que, os múltiplos usuários reivindicam vazões muito além da disponibilidade hídrica (vazão de regularização e vazão outorgável) do reservatório. O reservatório já passou por uma

crise entre 1998 e 2003, quando chegou muito próximo do seu volume morto, e desde 2012, está novamente em um ciclo de anos secos, com o volume armazenado mais uma vez se aproximando da cota do colapso. Contudo, as crises (anterior e atual) no abastecimento público apontam não para o clima como culpado, mas para a falta de gestão dos recursos hídrico eficiente e contínua.

A operação de um reservatório, quando bem executada, compatibilizando adequadamente oferta (disponibilidade) e demanda de água, evita ou atenua os conflitos. Uma das ferramentas mais usadas para auxiliar a operação de reservatórios é a curva-guia, que consiste na divisão do volume útil do reservatório em zonas com estratégias diferenciadas de liberação de água para diferentes usos (BRAVO et al., 2006).

Este trabalho levanta a hipótese de que, é possível explorar a água que, em períodos de cheia extravasaria de um reservatório (vertimento) ou seria abstraída por evaporação, utilizando, nestes períodos, uma quantidade superior à vazão outorgável (que pode ser definida, por sua vez, com base na vazão de regularização). Ligada a esta hipótese, está a possibilidade de conceder, dinamicamente, uma nova outorga, %condicionada+ à vazão excedente no reservatório, que permitiria a retirada de uma vazão maior que a vazão outorgável %estática+ (apenas em períodos de cheia, quando o reservatório estivesse com uma grande quantidade de água armazenada) sem comprometer a segurança nos períodos secos (MACHADO et al., 2012; RIBEIRO e LANNA, 2003). Assim, usuários temporários, a exemplo dos irrigantes de culturas sazonais, poderiam ser atendidos nestes períodos de grande armazenamento de água, sem que os usuários permanentes, a exemplo do abastecimento humano, fossem prejudicados caso ocorresse um ciclo de anos secos.

Destarte, o objetivo geral da pesquisa é:

Realizar um estudo da gestão do reservatório Boqueirão e através da operação deste, testar a hipótese da utilização de uma vazão superior à vazão outorgável %estática+, em períodos de cheia, por meio do aproveitamento da água vertida ou perdida por evaporação.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- ✓ Analisar a gestão de Boqueirão em períodos de crise, especialmente na crise atual (2012-2015) com o auxílio de simulações, de cenários que poderiam ter ocorrido;

- ✓ Desenvolver uma curva-guia para operação do reservatório com base na liberação de uma vazão excedente em períodos de cheias;
- ✓ Fornecer subsídio para auxiliar na implantação do instrumento da outorga por meio da sua expansão variável sazonalmente.

Esta dissertação é composta por sete capítulos, sendo esta introdução o primeiro deles, que contém, além da introdução ao tema estudado, a hipótese levantada no trabalho e os objetivos do mesmo.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada como base para o desenvolvimento da pesquisa, onde são exibidos conceituações e estudos utilizados como referência para elaboração deste trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia de elaboração da dissertação, contendo o caso de estudo, os dados, modelos e programas utilizados e os passos para chegar aos resultados do trabalho.

O quarto capítulo apresenta os primeiros resultados da dissertação, por meio da análise da gestão do reservatório estudado.

O quinto capítulo apresenta os demais resultados encontrados na pesquisa, em especial a aplicação da curva-guia, e a discussão destes.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões da dissertação e algumas sugestões pertinentes a uma possível continuação da pesquisa. O sétimo capítulo traz as referências bibliográficas citadas na pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gestão de Recursos Hídricos

A água vem sendo utilizada para diversos fins ao longo do tempo, como para abastecimento humano, produção agrícola, produção de energia, produção industrial, transporte de cargas, lazer, além de servir como fonte para a vida selvagem e de habitat para a vida aquática. Os recursos hídricos têm atendido a população, ainda, como local para despejo de resíduos das mais diversas origens, o que tem comprometido a sua qualidade. A diminuição da quantidade e a deterioração da qualidade da água afeta a saúde e a vida, de uma maneira geral, dos que fazem uso desta, além de afetar o equilíbrio ambiental local. Existe ainda a beleza de um ambiente aquático, o que torna as proximidades de rios, mares e outros corpos d'água, lugares atrativos para se construir estabelecimentos para lazer, comércio e até moradias. Quando bem geridos, os recursos hídricos podem permanecer fornecendo benefícios econômicos, sociais e ambientais aos seus usuários.

À medida que a exploração dos recursos hídricos é feita sem uma preocupação com relação à capacidade e a qualidade do corpo hídrico, de maneira desordenada, sem sua devida gestão, ocorre o comprometimento do mesmo, podendo este, vir a falhar qualitativa e/ou quantitativamente, especialmente em situações extremas (secas e enchentes). Trabalham para evitar tais falhas os profissionais de recursos hídricos, hidrólogos, gestores, engenheiros, entre outros. Estes profissionais são capacitados para fazer um planejamento adequado dos recursos hídricos, seja este estrutural (físico, como construções de barragens, por exemplo) ou não estrutural (planejamento, acompanhamento, estudos, gerenciamento), de forma que o recurso seja utilizado da melhor forma possível, por meio da realização da gestão de recursos hídricos (LOUCKS et al., 2005).

A conscientização geral sobre a importância de cuidar do meio ambiente para que os recursos utilizados hoje, não venham a se exaurir para as gerações futuras (sustentabilidade) está cada vez mais concreta, em especial no que diz respeito aos recursos hídricos. Esta ideia tem sido difundida globalmente, atingindo inclusive países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, entre eles o Brasil.

A Lei nº 9.433, promulgada em 08 de janeiro de 1997, que Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, é um marco das políticas públicas ambientais brasileiras (BRASIL, 1997). Esta lei iniciou um novo enfoque integrado para a gestão de recursos hídricos através da introdução de planejamento e de instrumentos econômicos. Contudo, dezoito anos após a lei ter entrado em vigor, muitas das mudanças propostas na mesma, ainda estão em fase de implementação, enfrentando muitos desafios que dificultam a real consolidação dos instrumentos propostos no Art. 5º da referida lei, quais sejam:

- I - os Planos de Recursos Hídricos;
- II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Outro divisor de águas das políticas públicas ambientais brasileiras foi Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 2000). Entre as atribuições da ANA estão o poder de outorga e de fiscalização das águas de domínio da União, que, segundo a Constituição Federal, são aquelas que banham mais de um Estado da Federação, fazem divisa com Estados nacionais e fronteira com outros países, águas acumuladas em represas construídas com aporte de recursos da União e o Mar Territorial brasileiro, incluindo baías, enseadas e estuários, além das zonas de mar aberto que podem ser usadas para cultivo no mar.

De acordo com essa definição, mesmo os reservatórios que represem águas dentro de limites estaduais, desde que tenham sido construídos com recursos da União, são de domínio da União e, de modo que, os mesmos devem ser geridos pela ANA. Este é o caso dos reservatórios construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, criado em 1909, chamado inicialmente de Inspetoria de Obras Contra as Secas, tendo por objetivo oferecer ao homem as condições básicas para que ele desenvolva seu lado empreendedor e busque da vida a força para conseguir uma sobrevivência com dignidade (DNOCS, 2015). O

DNOCS foi responsável pela construção de muitos dos grandes açudes que hoje abastecem o semiárido brasileiro. Como tais construções foram efetivadas com recursos da União, todos esses reservatórios têm a ANA com órgão gestor de suas águas.

O semiárido, região caracterizada pelas altas taxas de evaporação e chuvas irregulares espacial e temporalmente, gera uma constante insegurança para a população que vive nestas áreas. No semiárido, a gestão dos recursos hídricos é ainda mais complexa, pois o gestor deve considerar a alta variabilidade hidrológica interanual, característica das bacias hidrográficas dessas regiões. Tais localidades são, em geral, atendidas por mananciais superficiais que, por sua vez, têm sua regularização plurianual, e apesar da grande capacidade de armazenamento, suas vazões de regularização, quais sejam, as vazões máximas que os reservatórios podem disponibilizar constantemente, sem que haja risco de falhas no atendimento, mesmo que ocorram longos períodos de escassez, são muito pequenas, dificultando o atendimento aos múltiplos usuários (abastecimento urbano, geração de energia hidrelétrica, contenção de enchentes, produção agrícola, piscicultura, recreação, entre outros).

2.2 Recursos hídricos no estado da Paraíba E Legislação

O estado da Paraíba (FIG. 1) tem a maior parte do seu território inserida no semiárido brasileiro, caracterizado por chuvas irregulares, altas taxas de evaporação, rios intermitentes e grandes reservatório de regularização plurianual para o abastecimento público.

A legislação de recursos hídricos no estado teve grandes avanços nas últimas décadas. Em 02 de julho de 1996, foi promulgada a Lei nº 6.308, que Instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba, visando o uso racional destes recursos, para a promoção do desenvolvimento e do bem estar da população do Estado da Paraíba. A Lei traz, em seu Artigo 2º, os seguintes princípios básicos:

- I - O acesso aos Recursos Hídricos é direito de todos e objetiva atender às necessidades essenciais da sobrevivência humana.
- II - Os Recursos Hídricos são um bem público, de valor econômico, cuja utilização deve ser tarifada.
- III - A bacia hidrográfica é uma unidade básica físico-territorial de planejamento e gerenciamento dos Recursos Hídricos.

IV - 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.

V - O aproveitamento dos Recursos Hídricos deverá ser feito racionalmente de forma a garantir o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente.

VI - 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.

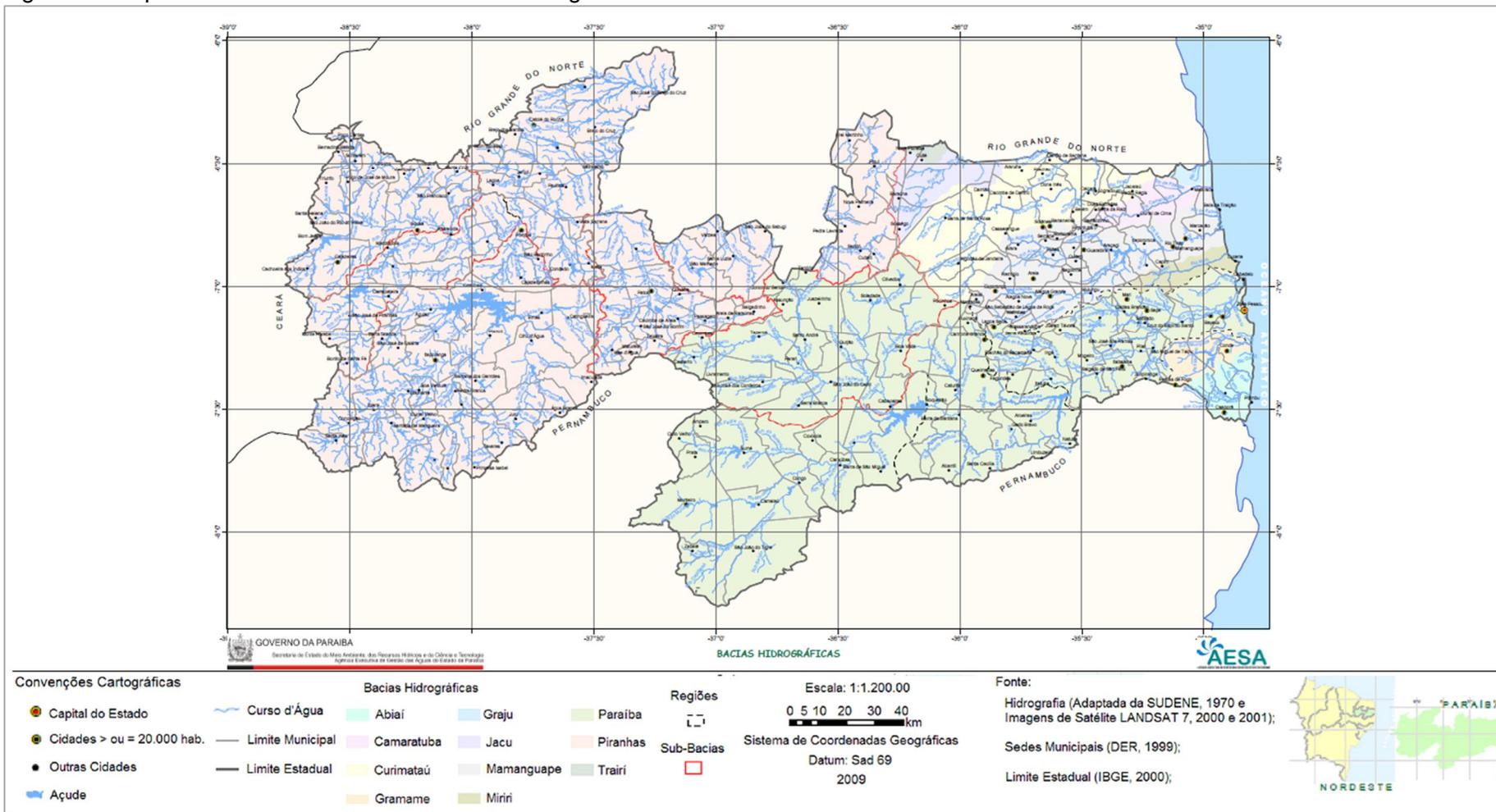
Tais princípios e diretrizes estão em conformidade com os da Lei nº 9.433/1997, exceto no que se refere à descentralização, presente na lei federal, mas ausente na estadual, e a forma como a lei apresenta seus princípios, excluindo o enquadramento dos corpos d'água e o sistema de informações sobre os Recursos Hídricos (VIEIRA e RIBEIRO, 2007).

A Lei nº 6.308/1996 já faz referência à elaboração de um Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH-PB, devendo este, obedecer aos princípios e diretrizes da Política Estadual de Recursos Hídricos e ter como base os Planos das Bacias Hidrográficas.

Em 2006, a AESA divulgou o Relatório Final Consolidado do PERH-PB. No relatório, fica claro que o PERH-PB não é uma junção dos planos das suas respectivas bacias hidrográficas, mas um documento estratégico e gerencial, possuindo diretrizes gerais de cunho socioeconômico e ambiental (disponibilidades e qualidade dos recursos hídricos), podendo ser utilizado também como ferramenta para resolução de conflitos.

A elaboração do PERH-PB foi realizada em três etapas que são descritas no relatório. A primeira Etapa foi nomeada "Consolidação das Informações e a Regionalização". Nesta etapa foram levantadas diversas informações sobre temas relacionados aos recursos hídricos do Estado, como, por exemplo: a caracterização do meio físico e os seus recursos naturais, a verificação da disponibilidade de recursos hídricos e da utilização atual desses recursos, um confronto entre a oferta e a demanda, a definição das regiões do PERH, entre outros.

Figura 1 - Mapa do Estado da Paraíba - Bacias Hidrográficas



Fonte: AESA (2015)

A segunda Etapa do PERH-PB, nomeada "Cenários, Definição de Objetivos e Identificação de Programas", inicia diretamente o Planejamento, estabelecendo cenários de grande importância no processo de gestão de recursos hídricos no estado da Paraíba.

A terceira e última Etapa, nomeada "Programas e Sistemas de Gestão do PERH", apresenta um detalhamento dos Programas de ação previamente identificados por meio dos levantamentos e estudos realizados nas etapas anteriores. Tais programas foram estabelecidos para um horizonte de 20 anos, iniciados em 2006, indo até o ano de 2025.

Segundo Vieira e Ribeiro (2007), apesar do alto nível dos estudos realizados na primeira etapa do PERH-PB, o plano apresentou algumas falhas, a exemplo: não mencionar os conflitos relacionados aos recursos hídricos, já existentes nas bacias do estado; a falta de critérios e diretrizes para alocação da água aos múltiplos usuários; a indefinição de prioridades na concessão de outorgas de direito do uso da água nas bacias do estado; e a falta de diretrizes e critérios para instituir a cobrança pelo uso da água no estado. Tais omissões fazem com que o PERH-PB não atenda os requisitos mínimos da Lei nº 9.433/1997.

2.3 Outorga dos direitos de uso dos Recursos Hídricos

A outorga dos direitos de uso da água tem em vista a alocação dos recursos hídricos de maneira que sejam atendidas as demandas no âmbito social, ambiental e econômico, reduzindo os conflitos entre os múltiplos usuários e não prejudicando o atendimento com tal recurso às demandas futuras (SILVA e MONTEIRO, 2004). Este instrumento vem sendo implementado em todo o Brasil, e tem como impasse a dificuldade de compatibilizar a oferta de água com as demandas requeridas, além da falta de fiscalização para que as outorgas e suas limitações sejam efetivamente cumpridas.

A vazão outorgável de um reservatório, aquela vazão disponível para utilização por meio da concessão da outorga, pode ser encontrada pelo cálculo de 70% da vazão de referência (que pode ser calculada com base na vazão de regularização), multiplicada por um fator de ponderação que represente a proporção da área de drenagem da bacia, em território brasileiro, no ponto do aproveitamento (ANA, 2006).

Utilizar apenas a vazão outorgável de um reservatório é uma forma de garantir que o atendimento pelo reservatório seja seguro, nunca apresente falhas. Contudo, esta vazão, em reservatórios plurianuais, costuma ser muito baixa, dificultando o atendimento às múltiplas demandas e, em certos casos, limitando o desenvolvimento econômico local e aumentando os conflitos pelo uso deste recurso (LIMA et al., 2005; RIBEIRO e LANNA, 2003; MACHADO et al., 2012).

2.4 Operação de Reservatórios

O principal objetivo da construção de um reservatório (através do represamento de um corpo hídrico) é garantir uma vazão constante, acima da vazão mínima natural. Desta forma, regiões de cursos d'água intermitentes podem ter água para consumo durante os meses ou anos de escassez. Ao projetar um reservatório, deve-se considerar todas as peculiaridades que podem interferir tanto na construção quanto, futuramente, na operação do mesmo (geologia e climatologia da bacia, relevo, demandas, capacidade de regularização etc.) (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

A operação de um reservatório é o setor da gestão que atua de forma mais direta. O operador do reservatório é responsável pela efetiva liberação da água para o atendimento às demandas. Ele tem o controle do atendimento, e o desenvolvimento de suas atividades deve ser constantemente fiscalizado pelo órgão gestor, a fim de garantir que as outorgas de uso da água sejam cumpridas.

O abastecimento urbano de água em Bacias hidrográficas com alta variabilidade hidrológica (precipitações irregulares no tempo e no espaço, altos índices de evaporação etc.), é em geral efetuado por meio de reservatórios de regularização de vazão, de modo a possibilitar o atendimento mesmo durante os meses ou anos de estiagem. Este é o caso das bacias hidrográficas de regiões semiáridas, como as do interior do nordeste brasileiro.

A operação desses reservatórios envolve muitas variáveis e múltiplos objetivos. Desta forma, utilizar regras de operação fixas, para reservatórios em regiões semiáridas, pode gerar, por um lado, grandes volumes de água extravasados e perdas consideráveis de água por evaporação, se a utilização da água for muito conservadora; ou, por outro lado, risco de colapso do sistema de abastecimento, caso a liberação de água seja excessiva.

Um dos problemas da operação de reservatórios de recursos hídricos é a falta de preparo do operador. Nem sempre, este controle da operação de um reservatório é efetuado por profissionais que tenham formação adequada para exercer tal função (hidrólogos, engenheiros de recursos hídricos etc.) A operação de reservatórios é, muitas vezes, realizada como se a água fosse um bem meramente econômico, deixando de lado as particularidades do sistema e os prejuízos que podem ser gerados com a falta de gestão. Os operadores acabam por minimizar o fato de não possuírem o domínio de fazer com que a água se precipite, operando o reservatório, muitas vezes, de forma irresponsável, não considerando os três aspectos: social, ambiental e econômico.

Um outro ponto que tem dificultado a operação de reservatórios de abastecimento no semiárido, é a construção descontrolada de pequenos e médios açudes nas bacias hidrográficas, a montante dos reservatórios principais. Muitos proprietários rurais constroem açudes ~~particulares~~ com considerável capacidade de retenção de água. Tais açudes interferem diretamente na recarga dos açudes de maior porte, uma vez que, a água que chegaria até os reservatórios maiores, como os construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas . DNOCS, que abastecem grandes populações, fica retida nestes reservatórios menores, que, muitas vezes, favorecem um pequeno grupo de pessoas. Um prejuízo ainda maior é o fato de que, essa água retida em açudes menores costuma evaporar-se rapidamente, não chegando a ser utilizada.

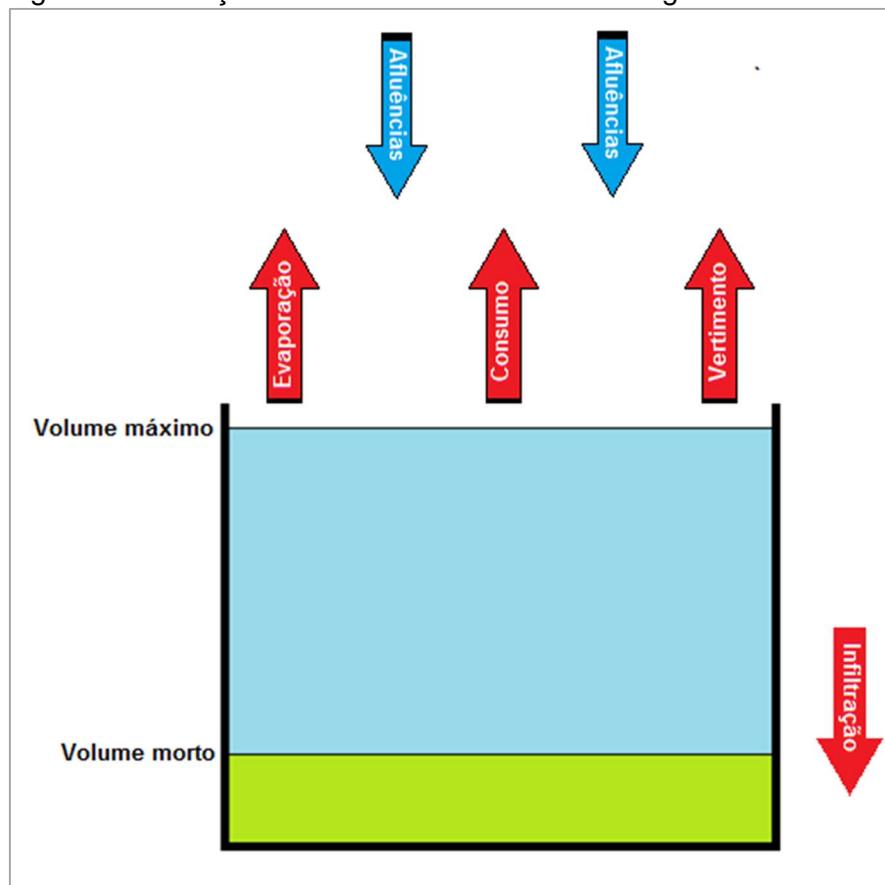
A operação de um reservatório deve ser feita com base em estudos das características do mesmo, levando em conta as particularidades climáticas, físicas (estruturais) e sociais, para que o planejamento do uso da água seja o mais eficiente possível. Para tanto, faz-se necessário o uso de ferramentas que auxiliem o operador nas tomadas de decisão, como por exemplo, o balanço hídrico, curvas de garantia, curvas-guias, entre outros. Modelos de simulação e de otimização, têm sido cada vez mais utilizados para o desenvolvimento dessas ferramentas, oferecendo suporte técnico ao operador na tomada de decisão.

Um exemplo de modelo de simulação muito simples, utilizado para operação de reservatórios é a Standard Linear Operation Policy - SLOP (Política Operacional Linear Padrão). O modelo SLOP determina que, enquanto houver água no reservatório, esta deve ser liberada para o atendimento às demandas. Caso o volume armazenado seja inferior ou igual às demandas, toda a água deve ser

liberada para o consumo. Caso o armazenamento esteja superior à quantidade de água demandada, deve-se liberar o suficiente para o consumo e o excedente deve ficar armazenado no reservatório até que a cota máxima seja atingida, quando se deve começar o vertimento de água (LOUCKS et al., 1981).

Um outro modelo de simulação muito simples e também muito utilizado para estudo de sistemas hídricos é o balanço hídrico (FIG. 2), que considera basicamente o balanço das estradas do sistema (afluências) e das saídas do sistema (infiltração, evaporação, vertimento e retiradas para consumo).

Figura 2 - Balanço hídrico de um reservatório de água



Fonte: a própria autora

Os modelos de otimização podem ser lineares, não-lineares ou de programação dinâmica. Estes modelos são muito utilizados para estudos da operação de reservatórios, sendo os modelos de programação linear e dinâmica utilizados para problemas menos complexos (FARIAS, 2009). Alguns reservatórios apresentam complexidades em sua operação que impossibilitam a resolução dos problemas por programação linear e dificultam a resolução por programação

dinâmica, uma vez que a procura pela solução ótima acaba encontrando limitações computacionais (YEH, 1985). Este é o caso da modelagem de reservatórios com múltiplos usos.

Os algoritmos genéticos têm ganhado mais espaço no desenvolvimento de modelos de operação de reservatórios, pela eficiência em encontrar a solução ótima mesmo em casos complexos (não-lineares) (CHEN, 2003). Algoritmos Genéticos são modelos de otimização que se espelham na teoria de Charles Darwin de 1859 sobre a evolução dos seres vivos (seleção natural e sobrevivência do mais apto) presente no livro *A Origem das Espécies*. De acordo com Darwin: "quanto melhor o indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes" (GOLDBERG, 1989 apud NUNES et al., 2012). Os modelos de otimização que utilizam algoritmos genéticos buscam aleatoriamente as soluções possíveis para um determinado problema, e se mostram eficientes na resolução ótima de problemas complexos, com muitas variáveis, como foi o caso em estudo.

Com os avanços tecnológicos, em especial na área da informatização, existem inúmeras ferramentas disponíveis, pagas e gratuitas, para auxiliar o pesquisador na construção de modelos, tanto de simulação quanto de otimização, facilitando a resolução de problemas.

Alguns softwares trabalham em conjunto com outros já popularizados, de fácil acesso. Um desses softwares é o Evolver, que trabalha com otimização na solução de problemas, sendo utilizado como suplemento para o Microsoft Excel (PALISADE CORPORATION, 2013). Para chegar até a solução ótima de um determinado problema o Evolver utiliza o OptQuest e algoritmos genéticos. O programa utiliza ainda métodos de programação linear, quando o problema é identificado com sendo linear. O OptQuest faz uso de otimização matemática, componentes de rede neural e meta-heurística, tudo em um método composto, para buscar as soluções ótimas para problemas de planejamento e decisão. O programa utiliza um grupo de algoritmos genéticos que buscam as melhores soluções para algum problema, utilizando também distribuições de probabilidade e simulações que avaliam ainda a incerteza presente no modelo.

2.5 Vazão de Regularização

Regiões com alta variabilidade hidrológica sofrem com excesso de água em períodos de cheia e déficit de água em períodos de escassez. Para solucionar estes problemas, são construídos reservatórios de regularização, que acumulam água durante as cheias para disponibilizá-la durante os ciclos secos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Conhecer a vazão de regularização (vazão com garantia de 100% de que não ocorram falhas) de um reservatório é de grande serventia para a gestão deste, uma vez que, em poder desta informação, o gestor pode limitar as retiradas à disponibilidade do reservatório, garantindo fornecimento de água sem ameaças de colapso do sistema.

Muitos estudos têm se dedicado à busca das vazões de regularização de reservatórios, inclusive os planos de recursos hídricos estaduais e de bacias hidrográficas, entre estes, o Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FUSP, 2009) e o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (AESPA, 2006). Neira (2005) desenvolveu uma curva de regularização para reservatórios parcialmente cheios, utilizando teoria probabilística dos reservatórios e simulações de Monte Carlo. Melo (2011), calculou as vazões de regularização dos reservatórios contidos no Eixo Leste da transposição do rio São Francisco, utilizando programação não-linear. Asfora e Cirilo (2005) avaliaram a alteração do potencial de regularização de um reservatório, em decorrência das demandas a montante deste, para fornecimento de água a múltiplos usuários.

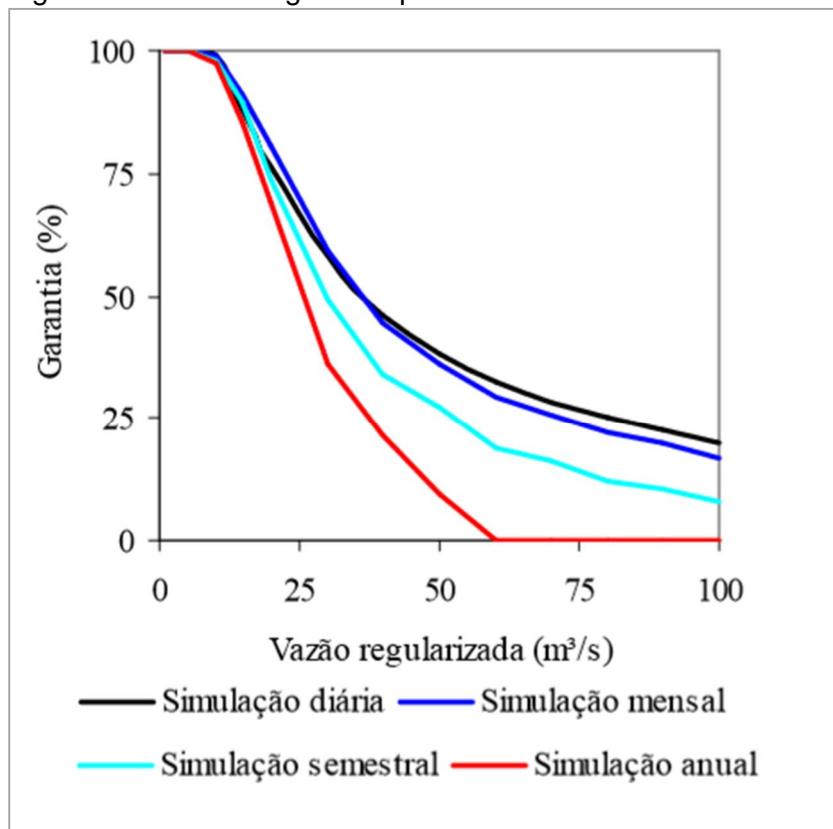
2.6 Curva de Garantia

A curva de garantia de um reservatório é, basicamente, a relação entre as vazões regularizáveis do mesmo, atreladas a uma garantia de que não ocorram falhas (ASFORA & CIRILO, 2005). À medida que a garantia diminui (admite-se falhas), é possível fazer uso de uma vazão maior. Com esta curva, pode-se planejar a outorga para diferentes usuários que tenham exigências distintas. Como exemplo, o abastecimento urbano é um uso que não pode apresentar falhas, logo, sua vazão deve ser outorgada com base na vazão regularizável com 100% de garantia. Já os produtores agrícolas, que fazem o cultivo de culturas sazonais, podem ter sua

outorga condicionada a uma vazão com uma menor garantia (80, 70%, por exemplo), uma vez que a utilização da água não será constante. A curva de garantia pode ser desenvolvida pela simulação do balanço hídrico do reservatório.

A FIG. 3 exemplifica curvas de garantia de vazões regularizáveis. O gráfico mostra alguns dos resultados obtidos por Mamede e Medeiros (2009), que analisaram os efeitos da simulação do balanço hídrico de reservatórios para diferentes espaços de tempo, observando a variabilidade da curva de garantia de oferta hídrica.

Figura 3 - Curvas de garantia para diferentes intervalos de simulação



Fonte: Mamede e Medeiros (2009)

2.7 Curva-Guia

A curva-guia é uma ferramenta utilizada para auxiliar o operador na tomada de decisão. Ela subdivide os níveis de armazenamento de um reservatório em zonas onde serão empregadas estratégias distintas/individuais de atendimento às demandas ou de liberações/retiradas de água, podendo cada zona variar sazonalmente ou permanecer constante durante o ano (BRAVO et al., 2006). Tal

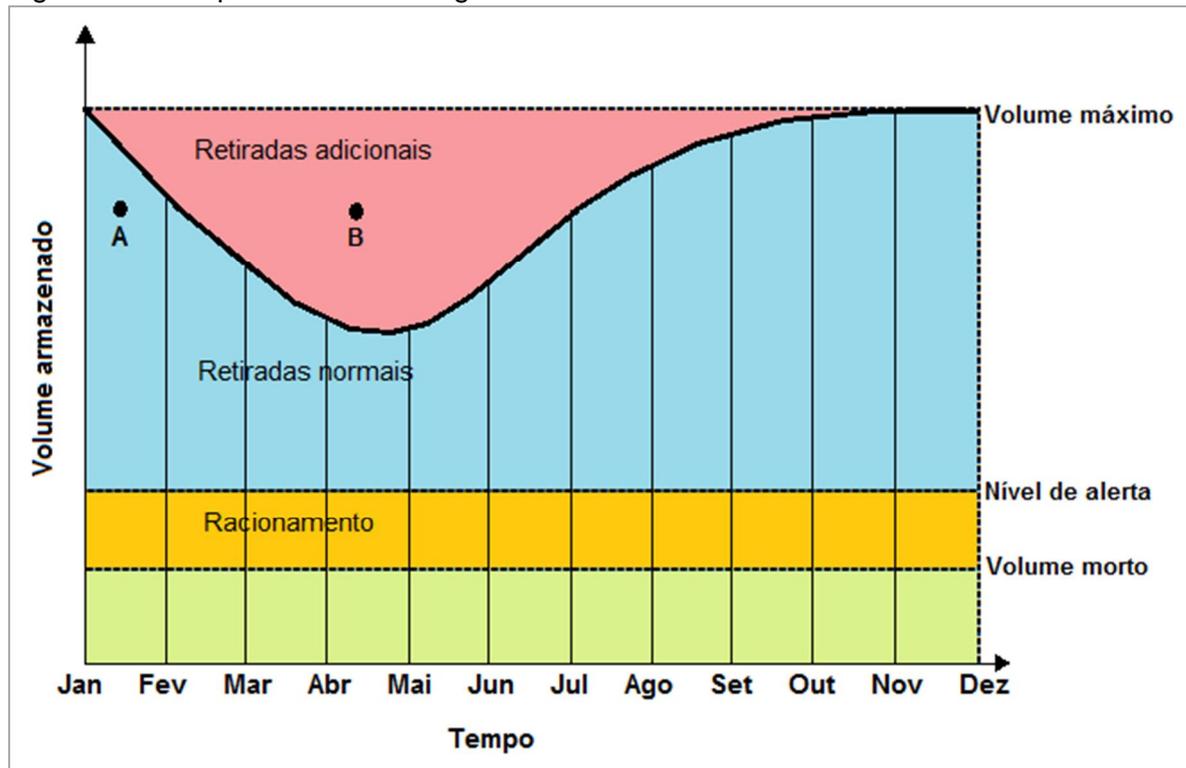
ferramenta pode ser usada no controle de cheias, limitando o armazenamento de água no reservatório a um nível máximo, ou para evitar colapsos no sistema de abastecimento em longos períodos de estiagem, por meio da redução do atendimento às demandas (acionamento).

A FIG. 4 traz dois exemplos de curvas-guia, uma variando sazonalmente, para contenção de cheia, e outra constante ao longo do ano, para racionamento de água (nível de alerta). Nesta figura, quando o volume armazenado estiver abaixo da curva-guia de contenção de cheia e acima do nível de alerta, o reservatório deve operar normalmente (volume em azul na FIG. 4). Caso o reservatório chegue ao nível armazenado acima da curva-guia, deve-se liberar água por vertimento (volume em cor de rosa na FIG. 4), de modo que, em caso de grandes afluências na bacia hidrográfica, a água seja retida pelo reservatório, evitando, por exemplo, que as cidades a jusante sofram com enchentes. Pode-se observar que os pontos A e B, mesmo estando na mesma cota, indicam operações distintas, uma vez que a curva-guia é sazonal. O ponto A encontra-se em um mês que permite que o reservatório esteja com um maior volume armazenado, uma vez que, o mês de janeiro (neste cenário hipotético) não recebe grandes afluências. Já o ponto B, encontra-se em um mês que pode receber grandes volumes de água, sendo indicado para este caso o vertimento. Caso o nível do reservatório fique abaixo do nível de alerta (volume em amarelo na FIG. 4) as vazões retiradas deverão sofrer reduções, de maneira que o horizonte de atendimento às demandas seja ampliado.

Nas regiões com alta variabilidade hidrológica, a curva-guia, quando usada para conservação de água, tem por base a moderação do uso/fornecimento do recurso durante períodos nos quais o reservatório atinge determinados níveis de armazenamento (níveis de alerta), permitindo que haja água para ser utilizada caso ocorra uma estiagem prolongada. Essa redução do fornecimento acontece de forma gradual, com o intuito de evitar que os usuários venham a ficar sem água repentinamente (CHANG et al., 2010).

Os estudos utilizando curva-guia vêm evoluindo desde a década de 1960, quando esta ferramenta começou a ser aplicada (e.g., MAAS et al., 1962; REVELLE et al., 1969), incorporando novos aspectos da moderna gestão de recursos hídricos nas rotinas operacionais dos reservatórios.

Figura 4 - Exemplo de uma curva-guia variável sazonalmente



Fonte: a própria autora

Entre as pesquisas recentes utilizando curvas-guia, Bravo et al. (2008) utilizaram curvas-guia como regras de operação para controle de cheias em um reservatório, com base na previsão de vazão, empregando uma técnica de parametrização, simulação e otimização. Chang et al. (2010) propuseram um modelo híbrido incorporando a alocação gradual de água por meio de otimização em um quadro de simulação para calcular o abastecimento de água com base em curvas-guia. Lee et al. (2011) utilizaram curvas-guia para controle de enchentes incorporando a influência das mudanças climáticas. Zhou e Guo (2013) propuseram um modelo para obtenção de curvas-guia de um reservatório com usos múltiplos, incluindo uma curva-guia ecológica, tendo como objetivo fornecer auxílio para a adaptação de reservatórios já existentes às mudanças climáticas. Taghian et al. (2014) utilizaram curva-guia em um modelo para a liberação de água para abastecimento.

Em geral, a curva-guia tem sido utilizada como uma limitação na operação: no controle de cheias, limitando o nível de água armazenada a uma altura máxima, e, para evitar colapsos de abastecimento, reduzindo a quantidade de água fornecida aos usuários.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

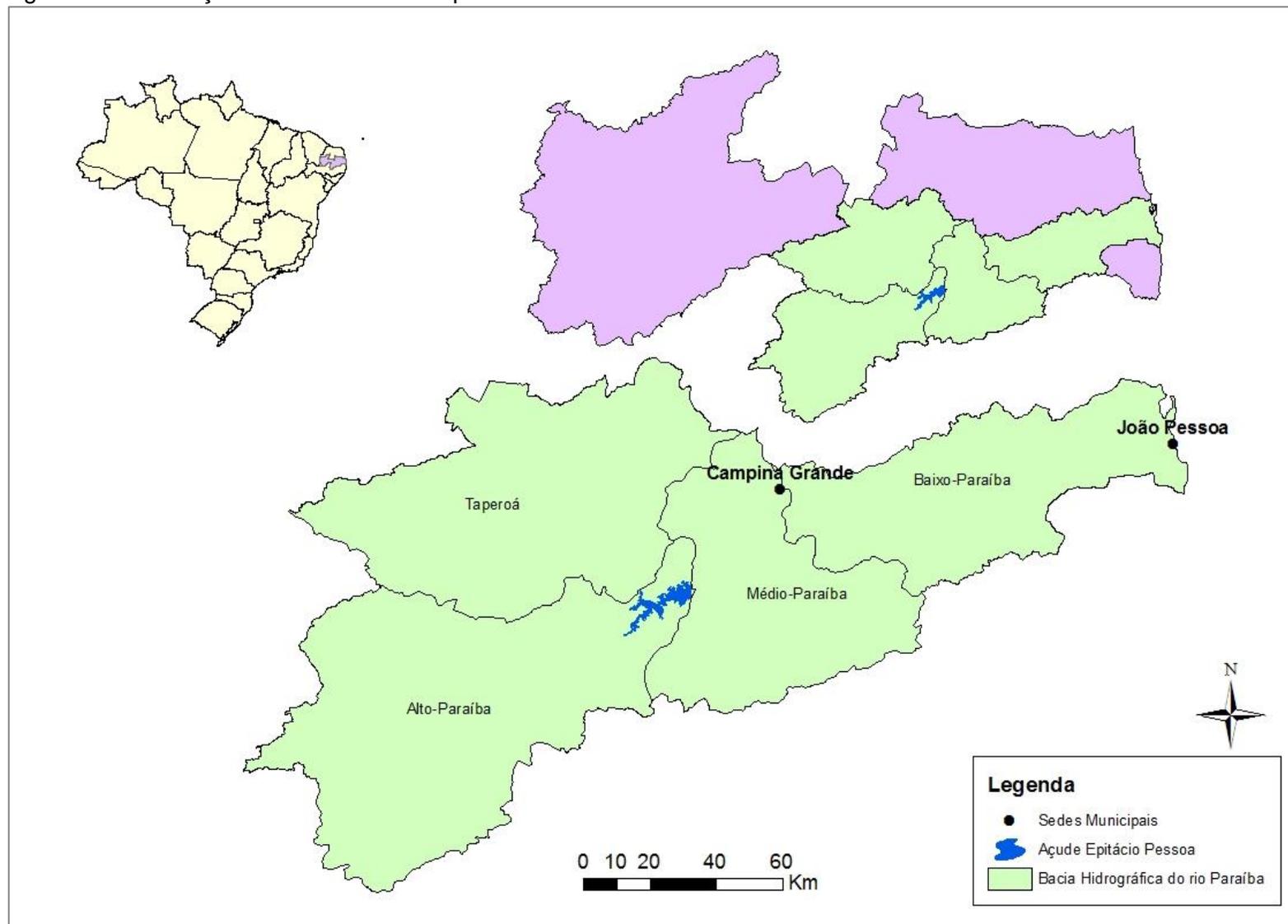
3.1 Caso de Estudo

O Açude Epitácio Pessoa, conhecido por Boqueirão, é o segundo maior reservatório de água superficial do estado da Paraíba, e o fato de abastecer uma população de cerca de 700 mil de habitantes, polarizada por Campina Grande, maior cidade do interior do estado e núcleo educacional, econômico e industrial, gera uma grande preocupação com a gestão dos recursos hídricos por ele disponibilizados, não só nos períodos de crise como o que ocorre entre 2012 e 2015 (RÊGO et al., 2012, 2014).

O reservatório está inserido na bacia hidrográfica do rio Paraíba, no limite entre as regiões do Alto e do Médio Curso do rio, a uma altitude de 420 m, entre as coordenadas $07^{\circ}28'04''$ e $07^{\circ}33'02''$ de latitude sul, $36^{\circ}08'23''$ e $36^{\circ}16'51''$ de longitude oeste (FIG. 5). O clima da região é semiárido quente de acordo com a classificação de Köppen, com sua estação seca abrangendo de nove a dez meses do ano. Boqueirão foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS entre os anos de 1953 e 1956 (DNOCS, 2015), e seu principal objetivo era solucionar os problemas de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, sendo também previstos os usos da água do reservatório para perenização do médio curso do rio Paraíba, piscicultura, irrigação, lazer e até para aproveitamento hidrelétrico.

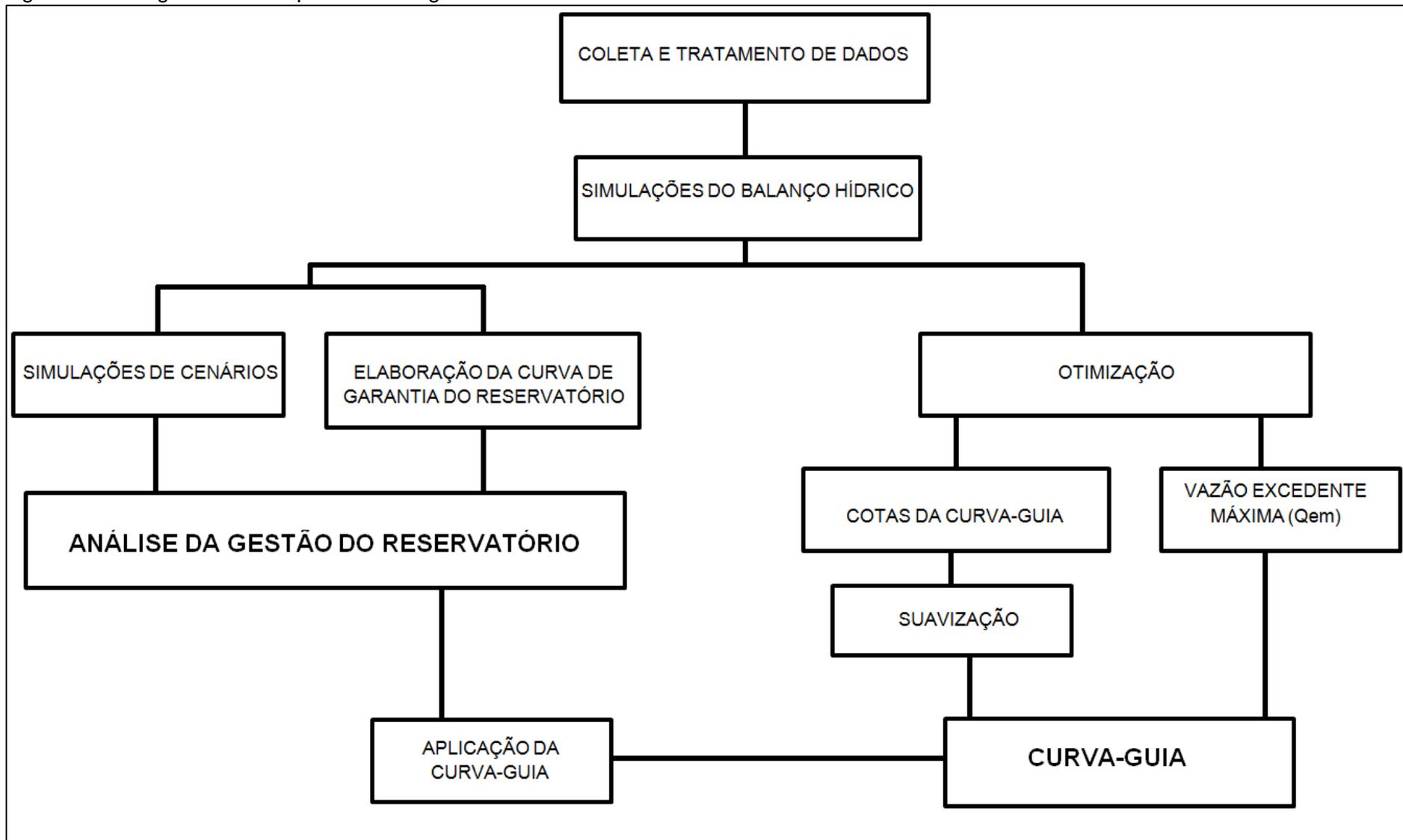
O reservatório foi projetado para uma capacidade máxima de armazenamento de 536 milhões de metros cúbicos de água. Contudo, em um levantamento batimétrico realizado no ano de 2004 foi atestado que sua capacidade máxima de acumulação foi reduzida para 411.686.287 de metros cúbicos. Em 2013 foi realizado pela Agência Nacional de Águas - ANA um novo levantamento batimétrico, que confirmou o de 2004 (ANA, 2015).

Figura 5 - Localização do reservatório Boqueirão



Fonte: AESA (2015); a própria autora

Figura 6 - Fluxograma das etapas metodológicas



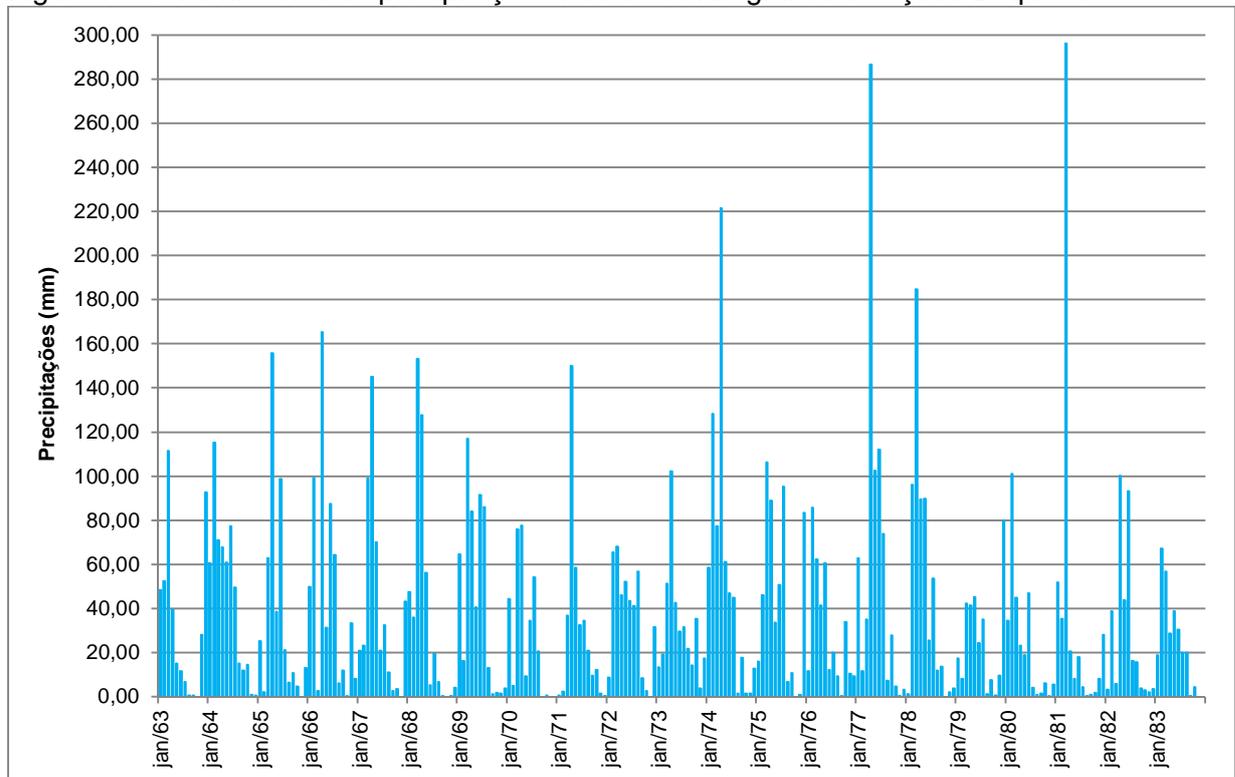
Fonte: a própria autora

3.2 Séries de dados

3.2.1 Precipitações

A série de precipitações na bacia hidrográfica do reservatório, mostrada na FIG. 7, foi obtida do Plano Estadual de Recursos Hídricos (UFPB/ATECEL, 1994). Esta série abrange o período de 1963 a 1983, totalizando vinte e um anos. A mesma foi usada para gerar uma das séries de vazões utilizadas neste trabalho (entre 1963 e 1983), para o balanço hídrico do açude Boqueirão.

Figura 7 - Série histórica de precipitações na bacia hidrográfica do açude Boqueirão



Fonte: UFPB/ATECEL (1994); a própria autora

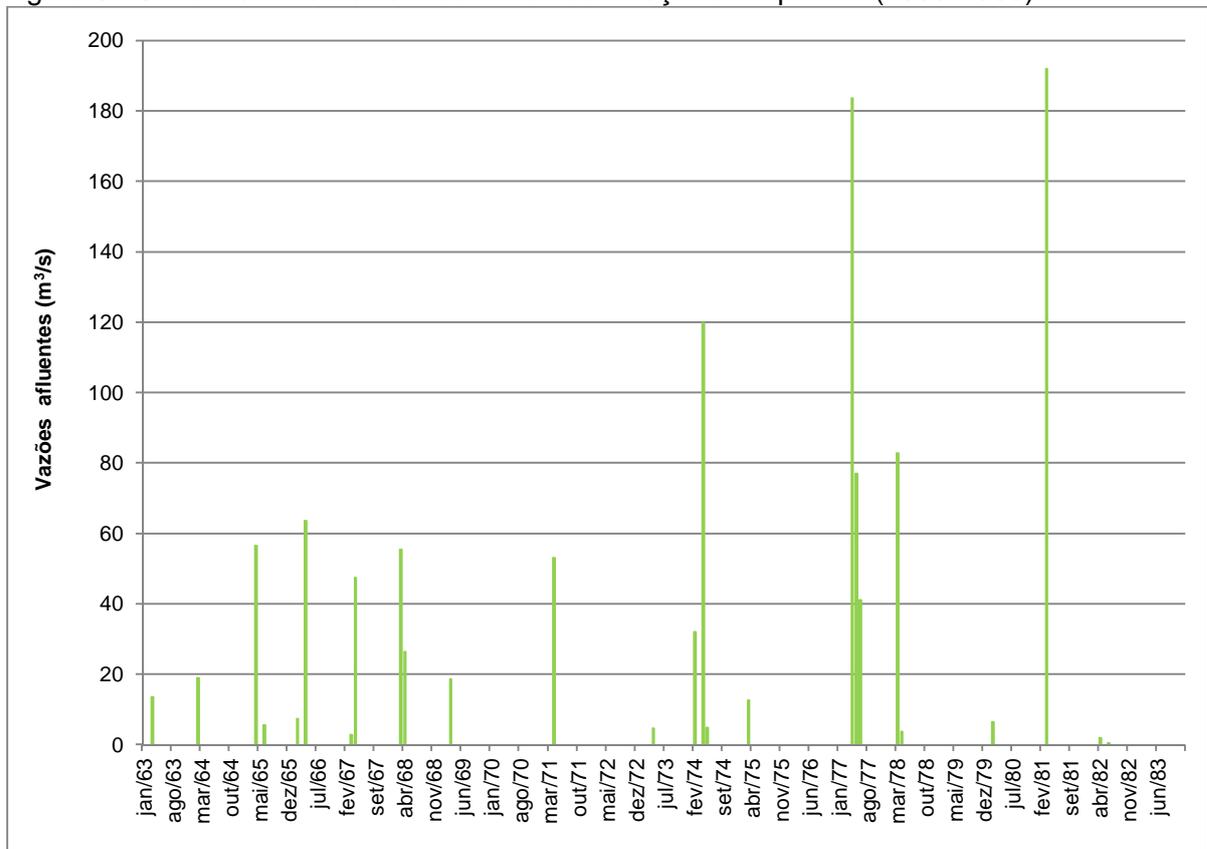
3.2.2 Vazões afluentes

Dois séries de vazões afluentes ao reservatório foram usadas neste estudo. A primeira foi obtida do Plano Estadual de Recursos Hídricos (UFPB/ATECEL, 1994) e abrange vinte e um anos de dados mensais, entre 1963 e 1983 (FIG. 8). Os valores de vazões afluentes desta série foram criteriosamente reduzidos (pelo método de tentativa e erro) para que a vazão de regularização, a partir deles obtida, se igualasse ao valor atualizado no Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba

de 2006 (AESA, 2006). Este procedimento se fez necessário para considerar a influência dos vários pequenos e médios reservatórios construídos na bacia hidrográfica, os quais reduzem a área efetiva de contribuição ao reservatório.

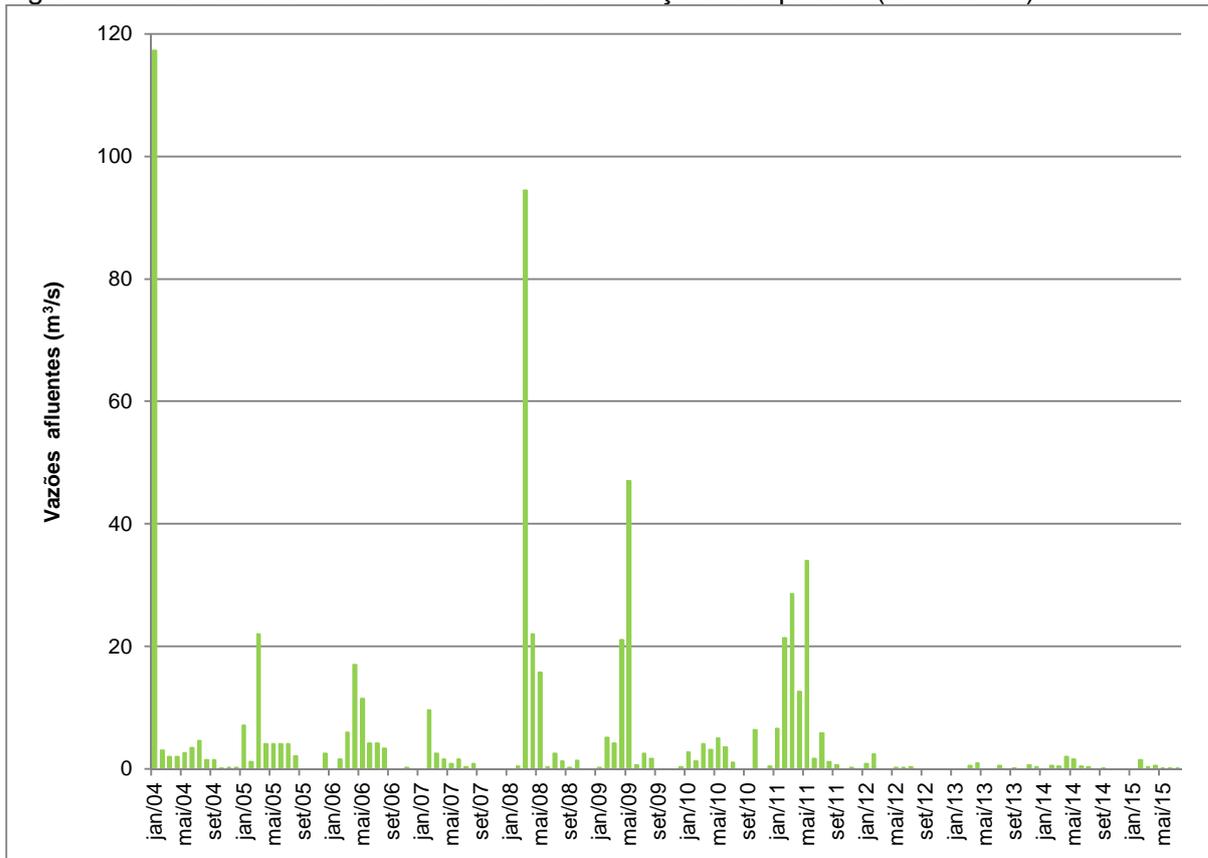
Também foi aqui utilizada outra série de vazões, de 2004 a 2015 (FIG. 9), calculada por meio de balanço hídrico fundamentado nas medições diárias do volume remanescente no açude, fornecidas pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba . AESA.

Figura 8 - Série histórica de vazões afluentes ao açude Boqueirão (1963-1983)



Fonte: UFPB/ATECEL (1994); a própria autora

Figura 9 - Série histórica de vazões afluentes ao açude Boqueirão (2004-2015)



Fonte: AESA (2015); a própria autora

3.2.3 Evaporação

Devido à inexistência de medições da lâmina evaporada no próprio reservatório, foram utilizados dados médios mensais de tanque evaporimétrico Classe A, coletados na Bacia Escola de São João do Cariri da Universidade Federal de Campina Grande entre 1987 e 2008 (FIG. 10). Tal série é considerada representativa devido à proximidade com o reservatório e às características semelhantes de clima, vegetação e relevo. Para a correção dos valores medidos no tanque Classe A, foram utilizados coeficientes (K_p) calculados por Oliveira et al. (2005) para o próprio reservatório de Boqueirão.

Figura 10 - Lâminas médias mensais evaporadas



Fonte: Oliveira (2005)

3.2.4 Curva cota-área-volume

Os dados da curva cota-área-volume do reservatório Epitácio Pessoa (TAB. 1) foram obtidos junto à AESA. Estes dados foram gerados em um levantamento batimétrico realizado em 2004.

Tabela 1 - Curva cota-área-volume do reservatório Epitácio Pessoa

Ponto da Curva	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
01	343,00	37.223	16.994
02	344,00	70.593	69.800
03	345,00	142.867	174.286
04	346,00	257.180	366.771
05	347,00	421.869	707.956
06	348,00	631.536	1.230.617
07	349,00	873.903	1.981.542
08	350,00	1.158.564	2.990.176
09	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

Fonte: AESA (2004)

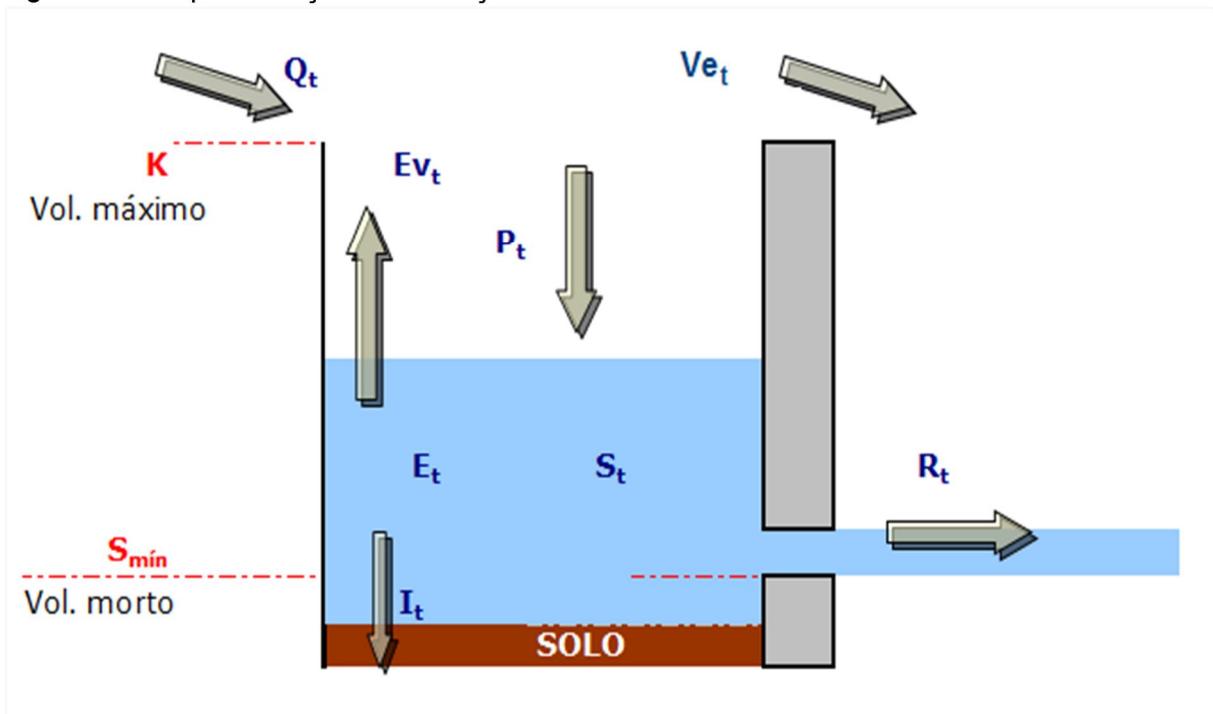
3.3 A simulação do balanço hídrico

O balanço hídrico de um reservatório é representado pela seguinte equação (FIG. 11):

$$S_{t+1} - S_t = P_t - E_t - I_t - R_t + Q_t - Ve_t \quad (1)$$

Onde, t é um índice que representa o intervalo de simulação atual e $t+1$ é o próximo intervalo de simulação; S o volume armazenado no reservatório; P o volume de água precipitado sobre o lago do reservatório; Q a vazão afluyente ao reservatório; E o volume de água perdido por evaporação (Ev) e infiltração (I) do reservatório; R o volume retirado do reservatório para consumo; e Ve o volume de água extravasado (este componente da equação só é considerado quando o reservatório recebe muitas afluências e, após atingir o volume máximo, ocorre o extravasamento de água).

Figura 11 - Representação do balanço hídrico de um reservatório



Fonte: Galvão (2004)

A FIG. 11 mostra como acontece o balanço hídrico em um reservatório, onde K é o volume máximo de armazenamento do reservatório e S_{min} o volume morto do reservatório (volume que fica abaixo do nível de captação por bombeamento). Este

balanço tem como restrição que S_t deve estar entre o volume máximo K e o volume morto S_{min} :

$$S_{min} \leq S_t \leq K \quad (02)$$

Na simulação do balanço hídrico sequencial, em intervalo de tempo mensal, foi usado o modelo Hidro implementado como planilhas em Excel. O Hidro foi desenvolvido por Silva (1997), para suporte do Laboratório de Metodologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba (LMRS-PB) e da Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais da Paraíba (SEMARH). O modelo sofreu modificações por Galvão et al.(2004), com a colaboração do Departamento de Sistemas da Computação (DSC) e da Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba (AAGISA), atual AESA.

O Hidro é um tipo de modelo de simulação para operação de reservatórios, podendo auxiliar na tomada de decisões sobre sua operação. O modelo Hidro trabalha com base em níveis de alerta.

3.3.1 Componentes do modelo

Os modelos de simulação para operação de reservatórios têm como principais componentes:

- **Variáveis de entrada:** compostas por vazões afluentes, evaporação do lago, as demandas, os limites operacionais dos níveis do reservatório, etc..
- **Variáveis de estado:** que variam durante a simulação, como os volumes armazenados nos reservatórios.
- **Variáveis de saída:** compostas pelos retornos da simulação, como as vazões liberadas para atendimento de uma certa demanda ou a escassez do sistema.
- **Parâmetros:** características do reservatório, como os volumes mínimo e máximo, a curva cota-área-volume.
- **Intervalo de tempo de simulação:** podem ser diários, mensais. Os intervalos de tempo mensais para estudos de conservação e intervalos diários para controle de cheias são os mais utilizados.

3.3.2 Planilhas do Hidro

O Hidro é composto pelas seguintes planilhas:

- **Curva C-A-V:** planilha de dados de entrada, onde são adicionados os valores de cota, área e volume do reservatório.
- **Dem, Afl, Evp:** planilha de dados de entrada, onde são inseridos os valores médios mensais históricos de evaporação no lago do reservatório, de vazão afluente e a demanda desejada.
- **Precipitações:** planilha de dados de entrada contendo a série histórica de precipitações mensais a partir da qual são obtidas as médias mensais de precipitação.
- **Vazões:** planilha de dados de entrada contendo a série histórica de vazões mensais a partir da qual são obtidas as médias mensais de vazão.
- **Alerta:** planilha de dados de saída que simula cenários de afluência e demanda (baseados nas séries de dados históricos) por tentativa e erro, podendo ser definidos os níveis críticos de operação que, por sua vez, poderão indicar o momento certo para tomada de decisões. Nesta planilha são definidos os níveis de alerta (NA).
- **Gerenciamento:** planilha de dados de saída onde se pode prever o volume acumulado no reservatório mês a mês a partir do da simulação de cenários (períodos secos ou normais) e tomar decisões para otimizar a operação do reservatório.
- **Previsão:** planilha de dados de saída onde se realiza a previsão de comportamento do reservatório para um determinado mês, baseado na previsão meteorológica, na série histórica de precipitações e nos resultados da simulação para o cenário atual.

3.3.3 Simulações para análise da crise

Foram realizadas simulações da operação do açude para a análise da gestão dos recursos hídricos nos últimos anos, simulando a operação com as retiradas históricas (praticadas) e com as outorgadas. O balanço hídrico também foi utilizado para estimar as retiradas para uso na irrigação. Neste cálculo, foram utilizados os dados de retirada para abastecimento urbano (fornecidos pela Companhia de Água

e Esgotos da Paraíba - CAGEPA), os quais foram subtraídos da retirada total do açude. Os valores restantes foram considerados como as retiradas para irrigação.

3.4 Curva de garantia

A curva de garantia de vazão disponível para retiradas do reservatório foi construída com a planilha Hidro, iterativamente, variando as retiradas do reservatório. Considerou-se o volume inicial correspondente a 50% da capacidade máxima de armazenamento (205.843.114 m³), com base em exemplos encontrados na literatura (TUCCI, 2005). Para dados de afluência foram consideradas as vazões mensais dos anos de 1963 a 1983.

3.5 O estabelecimento da Curva-guia

Considerando apenas o caso de uma única curva-guia, suas ordenadas mensais e a vazão excedente máxima (Qem) podem ser estabelecidas por meio da simulação do balanço hídrico do reservatório, sob séries históricas/sintéticas de precipitações e vazões afluentes, otimizando uma função objetivo. Propõe-se, aqui, como objetivo mais adequado, a minimização dos volumes vertidos e evaporados (Equação 3), considerando que o acréscimo de retirada além da vazão outorgável virá do aproveitamento desses volumes quando o armazenamento estiver em cotas altas.

$$Z = \sum_{t=1}^T \left[\frac{V_t}{V_{max}} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{i,t}}{E_{i,max}} \right] \quad (3)$$

onde Z é a função objetivo; T é o número de meses de simulação; Δt é o intervalo da simulação (mês); $E_{i,t}$ é a evaporação em cada mês t e V_t é o volume vertido em cada mês t .

As ordenadas mensais da curva-guia devem estar localizadas entre o volume mínimo operacional que, neste estudo, para obtenção da curva-guia, foi considerado como igual ao nível de alerta, e a capacidade do reservatório. Uma restrição necessária é a retirada mínima possível não ser menor que a vazão outorgável (Equação 4).

$$Q_{out} \geq Q_{em} \quad (4)$$

onde Q_{out} é a vazão outorgável; e Q_{em} é a vazão excedente máxima.

Apesar de, na FIG. 12, a vazão outorgável ser constante ao longo do ano, ela pode ser, obviamente, variável. Outras restrições podem ser acrescentadas para atender diversos objetivos operacionais.

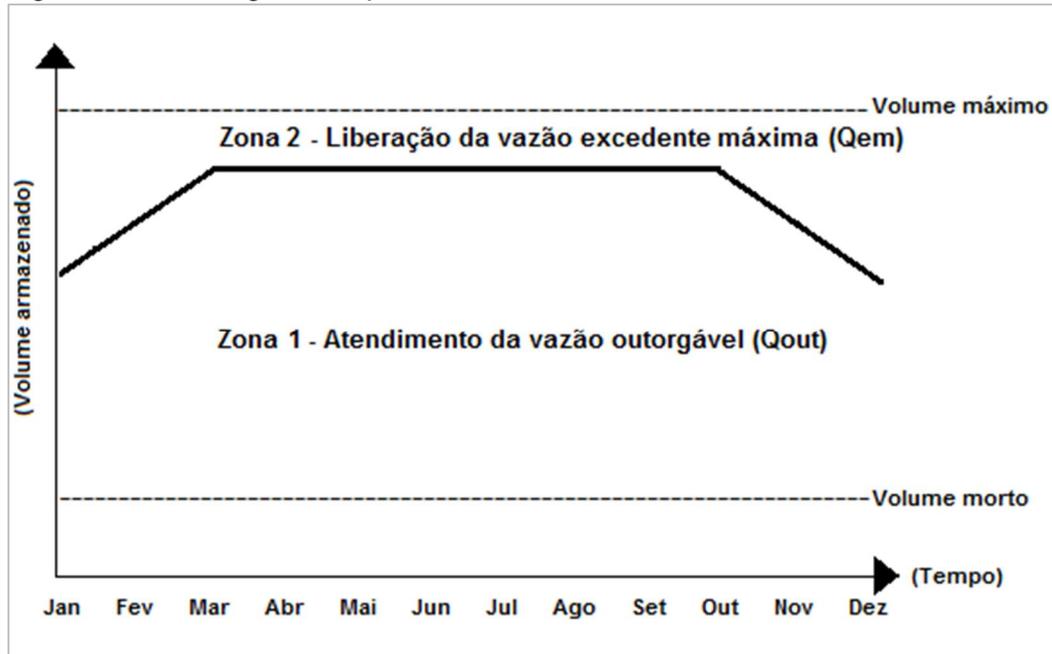
A simulação do balanço hídrico sequencial do reservatório, em intervalo de tempo mensal, e o cálculo da curva-guia, foram executados, neste trabalho, na planilha Hidro. A planilha Hidro em sua forma original, traz três níveis de alerta. Um deles foi adaptado para a curva-guia variável sazonalmente na modelagem aqui adotada. Para a otimização, foi utilizada a ferramenta Evolver, implementada como suplemento para o Microsoft Excel.

Muitas vezes o resultado otimizado das ordenadas da curva-guia apresenta valores conceitualmente inconsistentes com a realidade hidrológica e operacional. Para que a curva-guia apresente consistência conceitual e para que possa ser mais facilmente compreendida pelo operador, é usual realizar-se uma suavização dos valores encontrados na otimização (e.g., SARGENT, 1979). Neste trabalho a suavização é feita utilizando valores médios ou valores múltiplos de milhão mais próximos, para deixar as mudanças de níveis de um mês para outro mais brandas, substituir valores considerados inconsistentes e, conseqüentemente, tornar a curva-guia mais compreensível.

Ao invés da diminuição do atendimento às demandas em períodos de estiagem, a curva-guia aqui proposta objetiva indicar o aumento desse atendimento em períodos de cheias, quando o reservatório estiver com alto armazenamento, sofrendo vertimentos e/ou altas taxas de evaporação. A vazão aumentada, controlada pela curva-guia, é aqui denominada de Vazão Excedente Máxima (Qem). A FIG. 12 exemplifica uma curva-guia hipotética, variável sazonal ou mensalmente. A curva define duas zonas de liberação de água. Quando o armazenamento no reservatório estiver dentro da Zona 1, ocorre a operação com liberação da vazão outorgável (Qout). Se o armazenamento estiver suficientemente alto e atingir a Zona 2, a liberação pode ser maior e atingir a vazão excedente máxima (Qem). Várias curvas-guias podem ser estabelecidas, definindo várias zonas de operação e transições graduais entre as magnitudes das vazões excedentes.

Vale salientar que, a curva-guia é uma ferramenta que deve ser utilizada para o planejamento da operação de um reservatório (nível operacional estratégico). Quando a operação estiver em prática (nível operacional tático), caso ocorram eventos extremos como, por exemplo, ciclos muito longos de estiagem ou problemas estruturais, esta regra pode ser quebrada.

Figura 12 - Curva-guia de aproveitamento da vazão excedente



Fonte: a própria autora

A Curva-Guia e a Vazão Excedente Máxima (Q_{em}) foram calculadas utilizando a série de afluições de 1963-1983, sendo a curva suavizada para corrigir inconsistências. Em seguida, a curva estabelecida foi aplicada utilizando as afluições do período 2004-2015 para verificar seu desempenho em situações contrastantes: uma sequência de anos relativamente chuvosos (2004-2011) seguida por uma série de anos secos (2012-2015). Assim, a curva é testada em um período não utilizado para sua construção. Foi assumida como vazão outorgável para o reservatório, exclusivamente para os fins deste estudo, o valor de $1,23 \text{ m}^3/\text{s}$, igual ao da vazão de regularização.

4 ANÁLISE DA GESTÃO DO RESERVATÓRIO BOQUEIRÃO

4.1 Principais usuários do reservatório Boqueirão

4.1.1 Companhia de Água e Esgotos da Paraíba

A maior usuária da água de Boqueirão é a Companhia de Água e Esgotos da Paraíba . CAGEPA, que faz uso da água do açude para abastecer 18 sedes municipais, incluindo a cidade Campina Grande, e 8 distritos, por meio de dois sistemas adutores: o sistema adutor do Cariri (SAC) e o sistema adutor de Campina Grande (SACG). A CAGEPA possui atualmente duas outorgas para utilizar a água de Boqueirão, uma para o SACG, com vazão outorgada de 1.230 L/s, e a outra para o SAC com vazão outorgada de 71 L/s. Ambas as outorgas são datadas de 09 de julho de 2012. Se for considerada a vazão de regularização calculada no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PERH-PB) que é de 1.230 L/s, o total outorgado é superior à disponibilidade do reservatório. É importante destacar que as outorgas anteriormente concedidas à CAGEPA haviam chegado ao fim de sua validade em 2008, ou seja, a companhia passou quatro anos utilizando do recurso de forma ilegal, sem outorga (RÊGO et al., 2013).

Única usuária legal atualmente, a CAGEPA apresenta valores altíssimos de perda de água (cerca de 40%). Em 2012 esses valores chegavam a quase 50%, apontando para um manejo irresponsável desse recurso. Avaliando a situação com base nessas perdas, pode-se afirmar que a verdadeira demanda hídrica da CAGEPA poderia ser reduzida quase pela metade.

4.1.2 Irrigação

A segunda maior retirada de água do reservatório ocorre por parte dos irrigantes de lavouras, cerca de 5.000 entre pequenos médios e grandes produtores que têm a produção cultivada às margens do açude Boqueirão. Estes são usuários totalmente ilegais, uma vez que nunca receberam outorga para tal fim após a Lei 9.433/1997. Anteriormente, áreas de domínio da União, desapropriadas no entorno do açude, eram cedidas pelo DNOCS para agricultura de vazante (na bacia hidráulica) através de contratos de concessão remunerada de uso+

A irrigação na bacia hidrográfica é motivo de constantes discussões e de muitos questionamentos, desde a ocorrência da primeira crise (1998 - 2003) que se baseiam principalmente em três pontos: legalidade, viabilidade quantitativa e qualitativa.

- **Legalidade:** Além de a irrigação ser ilegal por falta de outorga, a mesma acontece também, e significativamente, em Áreas de Proteção Permanente - APPs, o que vai de encontro à legislação ambiental brasileira. Sendo assim, a prática de irrigação de lavouras no entorno de Boqueirão fere duplamente a legislação.
- **Viabilidade quantitativa:** Muito se questiona sobre a capacidade do açude de atender as demandas de abastecimento humano e de irrigação. Isto porque, apesar de o reservatório possuir um grande volume de armazenamento, sua vazão de regularização é baixa, em decorrência da região onde este está localizado, caracterizada por alta evaporação e períodos cíclicos de estiagem. Assim, caso a vazão regularizável do reservatório, estimada no PERH-PB, esteja correta, o mesmo não tem condições de atender ao abastecimento humano (uso prioritário) e à irrigação. Campina Grande, principal sede municipal a fazer uso da água do reservatório, está ainda em constante crescimento populacional, o que aponta para uma demanda ainda maior nos próximos anos.
- **Viabilidade qualitativa:** A produção agrícola irrigada é extensivamente praticada nas margens do reservatório, ocupando parte da sua bacia hidráulica. Ao fazer uso de defensivos agrícolas e fertilizantes, o solo local acaba por se contaminar e estes contaminantes vêm sendo carreados para dentro do açude ao longo dos anos, o que, acredita-se, tem diminuído a qualidade da água do reservatório. Um grande problema é o acompanhamento dessa qualidade. As análises de água regularmente feitas não são capazes de detectar os componentes químicos dos adubos e pesticidas ali utilizados. Uma vez que tais práticas ocorrem constantemente e, com a atual diminuição do volume do açude e conseqüente concentração destes contaminantes, não pode ser ignorada esta possível contaminação, que pode incidir em graves riscos à saúde de todos que fazem uso do

reservatório, já que o tratamento de água convencional não elimina estes contaminantes.

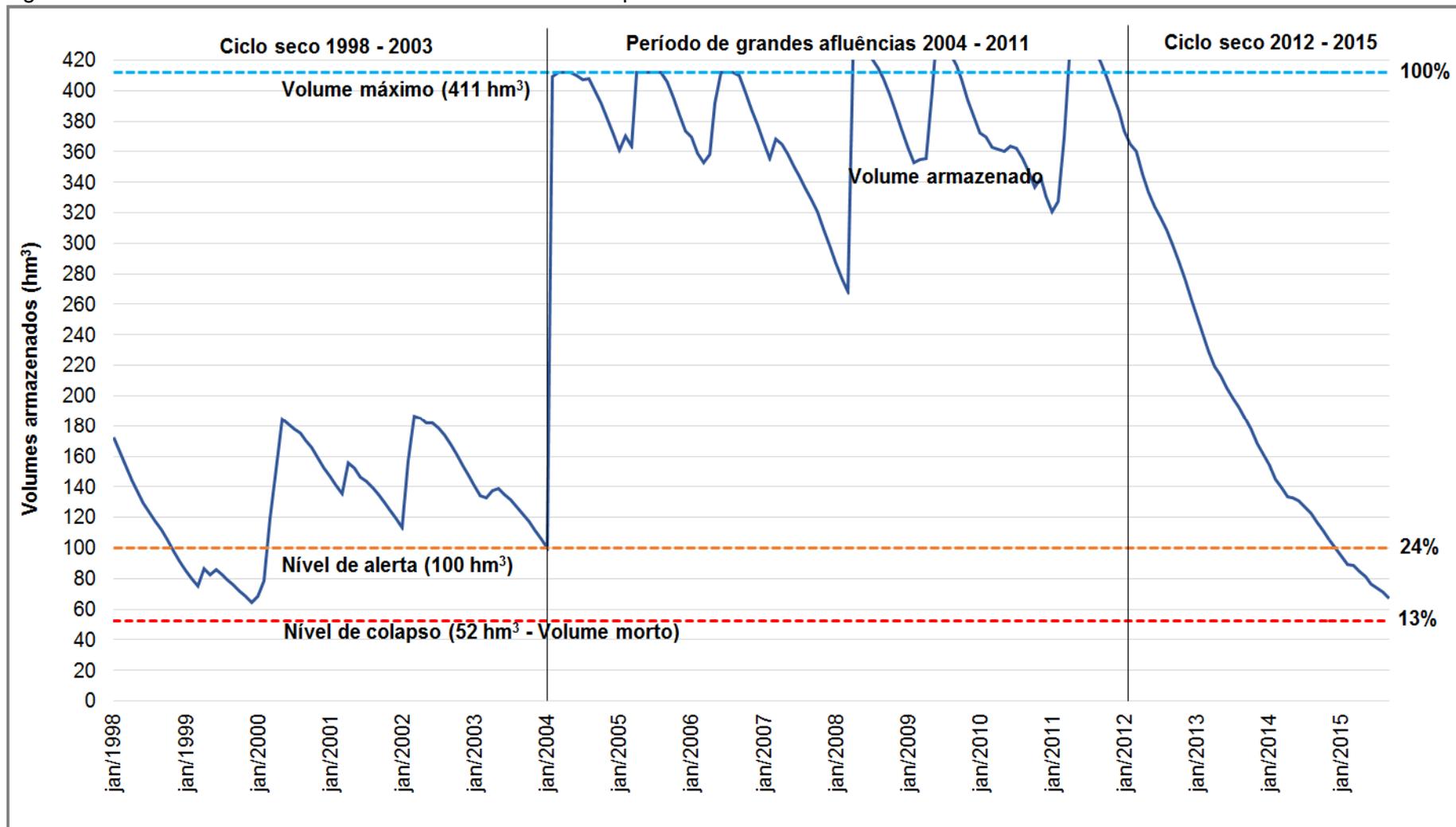
4.2 A gestão do açude Boqueirão

O açude Epitácio Pessoa passou cerca de 40 anos sem sofrer nenhuma ameaça de colapso. Apenas em 1998, o reservatório que vinha de uma série de anos com baixa pluviosidade teve a primeira ameaça concreta de atingir seu volume morto e provocar uma crise no abastecimento público das cidades que dependiam do mesmo. O primeiro racionamento de água na cidade de Campina Grande iniciou-se em 13 de outubro de 1998 e perdurou até 15 de março de 1999. Ocorreram ainda dois outros episódios de racionamento no reservatório durante esta mesma crise que durou até o ano de 2003, um entre setembro de 1999 e abril de 2000 e o último entre setembro de 2001 e março de 2002 (RÊGO et al, 2012).

Durante a crise de 1998 - 2003, algumas atitudes foram tomadas para que o colapso fosse evitado, entre elas a suspensão da irrigação às margens do açude e a suspensão da descarga para perenização do médio curso do rio Paraíba. Contudo, essas atitudes vieram com certo atraso, fazendo com que o açude ficasse muito próximo do colapso, não o atingindo graças às boas afluições ocorridas no ano 2000 e à grande recuperação do seu volume com as afluições de 2004. Essas últimas fizeram com que Boqueirão, ainda com pouca água acumulada, atingisse sua cota máxima em cerca de quinze dias (FIG. 13).

Os anos subsequentes também foram de afluições abundantes, ocorrendo vertimento em quase todos eles (com exceção de 2007 e 2010) com um destaque para 2011, quando o vertimento chegou a ocorrer em meados de setembro como mostra a FIG. 13. Este acontecimento foi considerado raro, já que o período chuvoso na região costuma ocorrer entre fevereiro e abril. Durante todo este período de conforto, a gestão do reservatório foi esquecida. Não havendo controle ou fiscalização, as águas de Boqueirão foram exploradas de maneira indiscriminada.

Figura 13 - Volumes reais armazenados no reservatório Boqueirão de 1998 a 2015



Fonte: AESA (2015); a própria autora

As retiradas totais, obtidas por meio do balanço hídrico, nos três últimos meses de 2011, quando o vertimento já havia cessado, tiveram uma média de 1,90 m³/s (TAB. 2). Já a média das retiradas para consumo do reservatório no ano de 2012 foi de 2,46 m³/s (TAB. 3). Estes valores estão muito acima da capacidade de regularização do reservatório estimada no PERH-PB (1,23 m³/s). O ano de 2012 foi de poucas afluições, apontando para o início de mais um ciclo seco com possível crise hídrica (RÊGO et al., 2012).

Os gestores do reservatório permitiram, em março de 2012, que as comportas de saída para perenização do médio curso do rio Paraíba fossem abertas alegando que, caso as afluições fossem semelhantes às de 2011, o reservatório poderia romper. Este foi um fato que chamou muito a atenção, uma vez que estas comportas foram desativadas na crise anterior e, em um ano com indícios de baixa pluviosidade (CPTEC, 2012), as mesmas foram abertas novamente, causando uma redução significativa no volume do reservatório no início do que seria um novo ciclo de estiagem na região.

Caso a gestão do reservatório estivesse sendo realizada de maneira eficiente desde 2012, quando foi iniciado o período de baixas afluições, com as retiradas limitadas ao usuário outorgado e aos valores outorgados, a população abastecida se encontraria, em uma posição relativamente mais confortável quanto ao risco de colapso do reservatório. Pode-se observar tal informação analisando a FIG. 14, que mostra que o nível de alerta teria sido alcançado apenas no início de junho (sete meses mais tarde do que realmente aconteceu), e chegado em agosto com um saldo de aproximadamente 19 milhões de m³ a acima do volume real.

Tabela 2 . Volumes iniciais e retiradas mensais de outubro a dezembro de 2011

Mês/ano	Volume inicial (m ³)	Retiradas (m ³ /s)		
		Abastecimento	Irrigação	Totais
Outubro/11	408.555.868	1,40	0,27	1,67
Novembro/11	396.891.909	1,40	0,35	1,76
Dezembro/11	386.270.227	1,46	0,83	2,29
Retiradas médias		1,42	0,48	1,90

Fonte: AESA (2014); CAGEPA (2015); a própria autora

Tabela 3 - Volumes iniciais e retiradas mensais de 2012

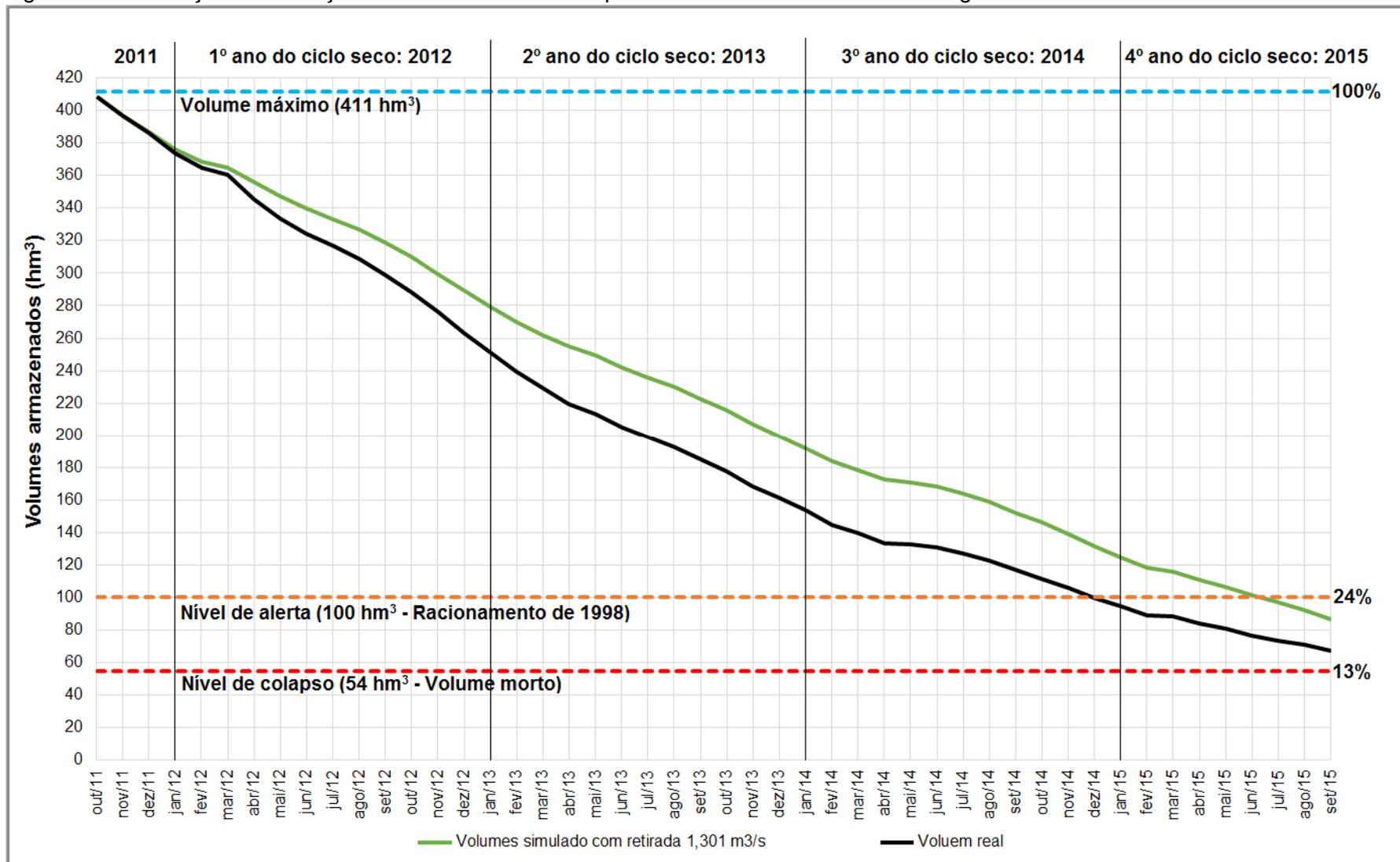
Mês/ano	Volume inicial (m ³)	Retiradas (m ³ /s)		
		Abastecimento	Irrigação	Totais
Janeiro/12	373.604.059	1,45	0,45	1,90
Fevereiro/12	365.119.908	1,47	0,70	2,16
Março/12	360.524.326	1,41	2,24	3,65
Abril/12	345.677.062	1,47	1,63	3,09
Mai/12	333.653.050	1,42	1,05	2,47
Junho/12	324.130.407	1,39	0,68	2,07
Julho/12	316.648.330	1,37	0,79	2,15
Agosto/12	308.826.158	1,41	0,86	2,28
Setembro/12	298.779.506	1,46	0,82	2,28
Outubro/12	288.102.291	1,47	0,80	2,28
Novembro/12	276.130.869	1,49	1,28	2,76
Dezembro/12	263.390.235	1,49	0,92	2,41
Retiradas médias		1,44	1,02	2,46

Fonte: AESA (2014); CAGEPA (2015); a própria autora

O nível de alerta adotado pela ANA, de 100 milhões de m³, é o mesmo utilizado para o início do racionamento de 1998 (crise anterior). Este nível é um tipo de curva-guia já que, a partir dele, ocorrem alterações no atendimento às demandas (racionamento). Desta forma, o reservatório fica subdividido em duas zonas, a primeira acima do nível de alerta e a segunda abaixo deste, e estas zonas apresentam diferentes estratégias de operação, uma vez que, ao chegar à segunda zona (abaixo do nível de alerta) o reservatório passa a sofrer racionamento em suas retiradas. Contudo, este nível de alerta foi definido sem um estudo prévio, o que causa desconfiância da sua eficiência.

O Ministério Público do Estado da Paraíba (MP-PB) mostrou-se atuante, tanto na crise passada quanto no início da atual. Em 17 de dezembro de 2012 foi instaurado o Inquérito Civil Público de nº 064/2012, objetivando promover a coleta de informações, depoimentos, certidões e demais diligências que se fizerem necessárias para o esclarecimento dos fatos (...) a respeito de um possível racionamento na cidade de Campina Grande. Este foi o primeiro passo rumo à discussão a respeito da crise que se iniciava.

Figura 14 - Simulação do balanço hídrico do reservatório Eptácio Pessoa com retiradas outorgadas



Fonte: AESA (2015); a própria autora

Em junho de 2013, com o volume do açude diminuindo acentuadamente, aconteceu a primeira interferência por parte da ANA nesta crise. A ANA é o órgão gestor do reservatório visto que, o açude foi construído com recursos da União. De início, a ANA se mostrou a favor da suspensão das retiradas para irrigação, retiradas por sinal muito significativas, chegando a uma média de 1,02 m³/s em 2012 (TAB. 3) e de 0,61 m³/s em 2013 (TAB. 4).

Não possuindo outorga para efetuar as retiradas, estes irrigantes eram usuários ilegais. Todavia, a ANA permitiu que a irrigação continuasse, desde que de forma reduzida, sendo permitido a tais usuários manter apenas 5 hectares irrigados por irrigante.

Tabela 4 - Volumes iniciais e retiradas mensais de 2013

Mês/ano	Volume inicial (m ³)	Retiradas (m ³ /s)		
		Abastecimento	Irrigação	Totais
Janeiro/13	251.559.647	1,44	1,23	2,67
Fevereiro/13	239.629.286	1,47	1,11	2,58
Março/13	229.257.949	1,49	1,23	2,71
Abril/13	219.447.225	1,44	0,68	2,12
Maió/13	213.416.710	1,42	0,60	2,02
Junho/13	205.230.966	1,43	0,32	1,75
Julho/13	198.580.048	1,39	0,52	1,91
Agosto/13	192.696.544	1,39	0,30	1,69
Setembro/13	185.266.179	1,65	0,14	1,78
Outubro/13	177.655.547	1,38	0,57	1,95
Novembro/13	168.297.707	1,40	0,28	1,69
Dezembro/13	161.700.044	1,41	0,37	1,78
Retiradas médias		1,44	0,61	2,05

Fonte: AESA (2014); CAGEPA (2015); a própria autora

Em audiência pública realizada em junho de 2013, a ANA autorizou as seguintes retiradas do reservatório:

- 127 L/s para o SAC (CAGEPA);
- 1.456 L/s para o SACG (CAGEPA);
- 15 L/s para abastecimentos difusos;
- 15 L/s para abastecimento de carros-pipa; e

- 130 L/s para Irrigação.

Deste modo a ANA permitiu que a CAGEPA fizesse retiradas de 1.583 L/s, o que significa 282 L/s acima da vazão outorgada pela própria ANA, e permitiu ainda que houvesse outras retiradas (abastecimentos difusos, carros-pipa e irrigação), totalizando 1.743 L/s retirados do reservatório.

De acordo com a lei das águas (9.433/1997), em períodos de crise, apenas os usos prioritários devem ser atendidos, quais sejam: abastecimento humano e dessedentação animal. Sendo assim ocorre o seguinte questionamento: como identificar um período de crise?

A omissão dos fatos para a população por parte dos gestores foi mais um ponto negativo nesta crise. Isto porque, a população de Campina Grande se mostrou muito consciente na crise passada, chegando ela mesma a pedir por racionamento ao ver o perigo de colapso se aproximar (RÊGO et al., 2001).

Na crise atual, a população foi mantida inocente, desinformada da gravidade da situação. Em todas as aparições públicas de representantes dos órgãos estadual (AESAs) e federal (ANA) na mídia, as declarações foram sempre tranquilizadoras, mantendo os usuários alheios à real possibilidade de crise no abastecimento.

O ano de 2014 foi o terceiro com chuvas abaixo da média. Todavia, a ANA adiou por diversas vezes a suspensão da irrigação, vindo esta a ocorrer apenas em 7 de julho de 2014. Na data, o açude se encontrava com um volume armazenado de aproximadamente 126 milhões de m³ (30,6%).

Apesar da ordem de suspensão da irrigação, cálculos do balanço hídrico apontaram o contrário. A TAB. 6 mostra que, além das retiradas feitas pela CAGEPA (valores medidos e fornecidos pela companhia) continuaram acontecendo outras retiradas de água, o que aponta para a continuação da irrigação.

O volume do açude Boqueirão continuou em declínio até que em dezembro de 2014 o armazenamento do reservatório ficou abaixo de 100 milhões de m³ (24% de sua capacidade de armazenamento). A partir deste mês, cerca de 500 mil habitantes passaram a sofrer com o racionamento de água, sendo o corte no fornecimento de água feito às 17 horas do sábado e a retomada no abastecimento efetuada às 5 horas da segunda-feira, totalizando 36 horas sem água.

Tabela 5 - Volumes iniciais e retiradas mensais de 2014

Mês/ano	Volume inicial (m ³)	Retiradas (m ³ /s)		
		Abastecimento	Irrigação	Totais
Janeiro/14	154.071.497	1,39	0,94	2,32
Fevereiro/14	144.639.522	1,34	0,27	1,61
Março/14	139.301.869	1,38	0,26	1,64
Abril/14	133.412.044	1,38	0,09	1,47
Mai/14	132.675.816	1,33	0,14	1,48
Junho/14	131.019.303	1,35	0,10	1,45
Julho/14	126.973.851	1,20	0,19	1,39
Agosto/14	122.532.823	1,15	0,21	1,36
Setembro/14	116.940.419	1,25	0,10	1,35
Outubro/14	111.464.343	1,22	0,00	1,22
Novembro/14	105.633.874	1,18	0,08	1,26
Dezembro/14	99.803.406	1,07	0,00	1,07
Retiradas médias		1,27	0,19	1,46

Fonte: AESA (2015); CAGEPA (2015); a própria autora

Passado o período de espera das afluições de 2015 na região, e não ocorrendo recargas significativas, em junho de 2015 foi anunciada a expansão do racionamento para 60 horas semanais, das 17 horas do sábado às 5 horas da terça-feira.

A falta de estruturação da CAGEPA não permite que a companhia realize um racionamento rotativo entre os bairros de Campina Grande, fazendo com que seja necessário o corte total de água para todo o município durante determinado período da semana. Este modelo de racionamento causa uma espécie de desigualdade no atendimento, uma vez que, a água não chega igualmente a todos os locais, prejudicando principalmente os bairros mais periféricos.

O racionamento por si só já pode ser considerado como um acontecimento catastrófico, uma vez que este traz inúmeros prejuízos à sociedade, principalmente a cidade de Campina Grande, que tem como principais fontes econômicas o comércio e a indústria e também, além dos prejuízos específicos desde método de racionamento, que acaba por prejudicar ainda mais as comunidades já marginalizadas.

Em 2015, o balanço hídrico continua mostrando retiradas além do que vem sendo medido pela CAGEPA, apontando, ainda que discretamente, para uma continuação da irrigação (TAB. 6).

Tabela 6 - Volumes iniciais e retiradas mensais de 2015

Mês/ano	Volume inicial (m ³)	Retiradas (m ³ /s)		
		Abastecimento	Irrigação	Totais
Janeiro/15	94.547.281	0,98	0,30	1,29
Fevereiro/15	88.985.150	1,02	0,03	1,05
Março/15	88.338.391	0,96	0,23	1,19
Abril/15	84.275.564	1,02	0,24	1,26
Mai/15	81.013.834	0,94	0,35	1,28
Junho/15	76.587.202	0,82	0,09	0,91
Julho/15	73.543.130	0,81	-	0,81
Agosto/15		0,78	0,08	0,86
Retiradas médias		0,92	0,18	1,07

Fonte: AESA (2015); CAGEPA (2015); a própria autora

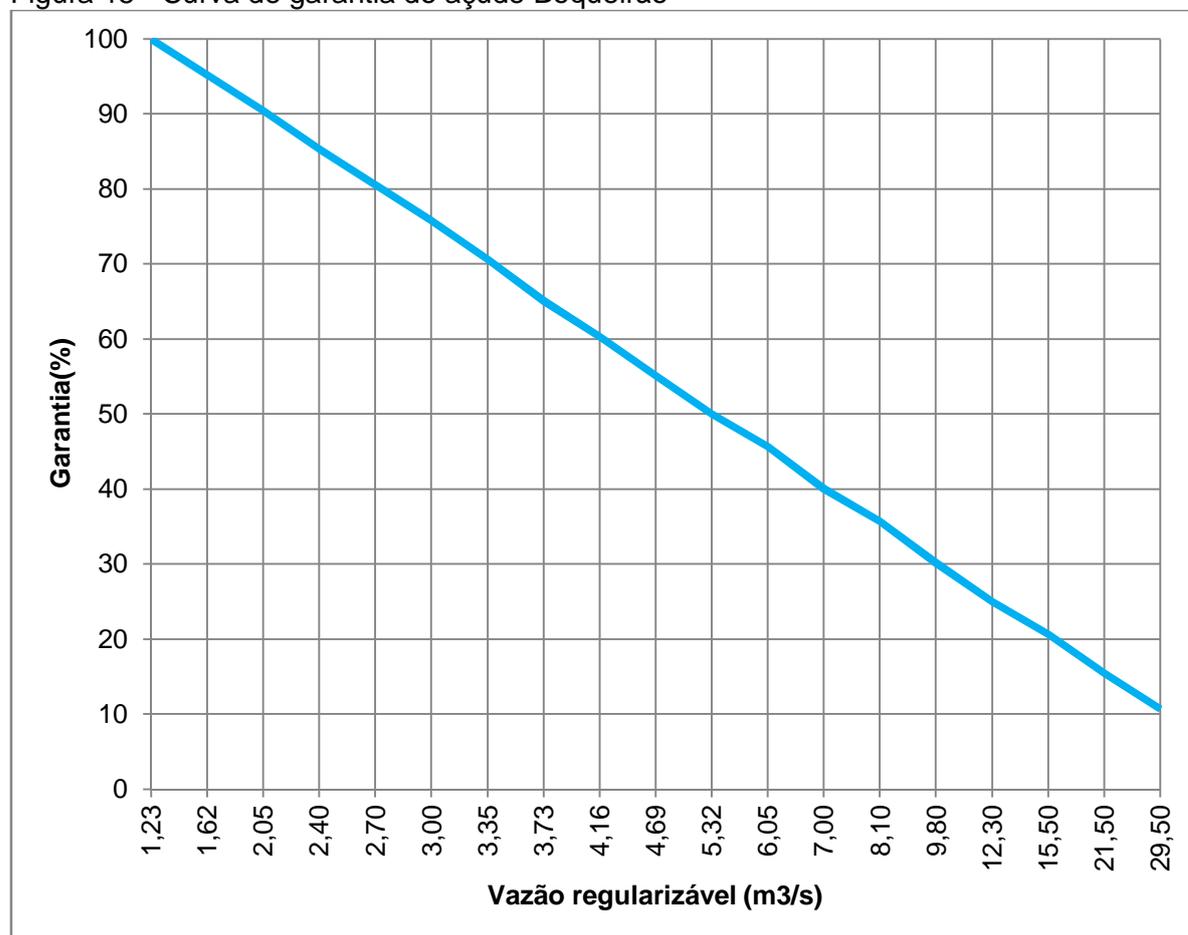
A FIG. 15 apresenta a curva de garantia encontrada para Boqueirão pela simulação do balanço hídrico. A vazão de regularização (com garantia de 100%) coincidiu com a vazão de regularização indicada no PERH-PB para o reservatório, qual seja 1,23 m³/s. A curva permite encontrar vazões para diferentes garantias. Esses valores auxiliaram na análise das retiradas reais de vazão do açude Boqueirão nos últimos anos apontando e estimando as probabilidades de ocorrências de falhas no atendimento, conforme exemplificado abaixo.

Em 2012 a média das retiradas de boqueirão (encontrada por meio do cálculo do balanço hídrico, utilizando a planilha hidro, o que também foi feito para os demais anos) foi de 2,46 m³/s. Com base na curva de garantia, com esta vazão sendo retirada, o reservatório estava operando com uma garantia de aproximadamente 85%, logo, o risco de falhas assumido era de aproximadamente 16%. Se for considerado o período de quarenta e oito meses (quatro anos), a população deixaria de ser atendida durante aproximadamente oito meses. Com as retiradas médias de 2013, 2,05 m³/s, a garantia de atendimento à população, pelo reservatório, era de 90%, o que implicava em um risco de falhas de 10% (aproximadamente cinco meses

em quatro anos). Em 2014, a vazão média retirada de Boqueirão era de 1,46 m³/s, mais próxima da vazão de regularização (1,23 m³/s), ainda assim, existia um risco de a população ser desabastecida em 3% dos meses (mais de um mês em quatro anos).

Apenas em 2015, quarto ano consecutivo com chuvas abaixo da média, com poucas recargas ao reservatório, e com a implantação do racionamento, as retiradas médias ficaram abaixo da vazão de regularização, 1,07 m³/s. Tais resultados mostram quão falha vinha sendo a gestão do açude Boqueirão, sendo a situação atual do reservatório um reflexo desta.

Figura 15 - Curva de garantia do açude Boqueirão



Fonte: a própria autora

4.3 Últimos acontecimentos

Pode-se considerar perda de água e desperdício de água como conceitos distintos. O desperdício de água é, em geral, responsabilidade do usuário, que deixa a torneira ligada ao escovar os dentes, que toma banhos mais longos do que o

necessário, que lava a calçada de sua residência com mangueira, entre outros inúmeros exemplos. Por outro lado, considera-se perda de água, aquela água que é retirada do reservatório e não chega até o usuário. São exemplos, as perdas causadas por rompimentos nas tubulações, os roubos de água que, por ventura, ocorreram entre a captação e a estação de tratamento e/ou a distribuição, os vazamentos nas tubulações de distribuição da água e na própria estação de tratamento, entre outros.

A FIG. 16 é a fotografia de um Outdoor colocado na cidade de Campina Grande no primeiro semestre de 2015. Apesar de a imagem já estar desgastada, pode-se identificar as seguintes informações: %Quase 40% da água tratada na Paraíba é desperdiçada+, %Água não se joga fora+, além de algumas imagens de usuários em sua rotina diária. Tal imagem traz um dado referente à perda de água, que é de responsabilidade única e exclusiva da companhia de abastecimento e que realmente vinha chegando a números alarmantes, mas é apresentado como se fosse, na verdade, referente ao desperdício por parte dos usuários.

A CAGEPA não só não assume a sua responsabilidade, como a transfere para a população, que é, na verdade, vítima da irresponsabilidade da companhia, uma vez que, a população, além de não receber este recurso que, de alguma maneira, se perde (vazamentos, roubos etc.), ainda arca com o prejuízo financeiramente, ao pagar a conta de água e esgoto todos os meses.

Em 17 de agosto de 2015, a ANA e AESA emitiram a RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA e AESA-PB nº 960, que %Estabelece condições especiais de uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão) e na sua bacia hidráulica e procedimentos pertinentes.+

De acordo com a resolução, as retiradas para as adutoras de Campina Grande e do Cariri (CAGEPA) devem ser limitadas às vazões de 881 L/s até 31 de outubro de 2015 e a 650 L/s a partir de 1º de novembro de 2015. Considerando que, o último comunicado oficial com relação às retiradas permitidas para a CAGEPA estabelecia uma vazão de 1.583 L/s, a redução das retiradas será, inicialmente de 702 L/s (44% da vazão anteriormente permitida), chegando em 1º de novembro, a 933 L/s reduzidos (59% da vazão anteriormente permitida).

Figura 16 - Fotografia de um outdoor na cidade de Campina Grande



Fonte: a própria autora

Caberá à CAGEPA a implantação de solução alternativa para a captação da água abaixo da cota mínima (volume morto) até 31 de outubro. Segundo a própria resolução, este nível equivale ao volume armazenado de 52,41 hm³ de água e o nível mínimo operacional do açude é igual a 20,33 hm³ de água armazenados. Acredita-se que este segundo nível mínimo se refira ao nível no qual a água seja considerada imprópria para o consumo, de acordo com algum estudo realizado pelas agências responsáveis (ANA e AESA).

Conforme a resolução supracitada, as agências (ANA e AESA) deverão, até o final de junho de 2016, examinar novamente o volume armazenado em Boqueirão, podendo alterar novamente as condições de utilização da água definidas na resolução.

Apenas as retiradas para abastecimento humano e dessedentação animal estão permitidas, permanecendo suspensas as retiradas para agricultura irrigada e demais usos consuntivos. A resolução altera temporariamente os usos outorgados e a fiscalização do cumprimento desta, será articulada pela ANA em conjunto com a AESA.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curva-guia calculada e suavizada

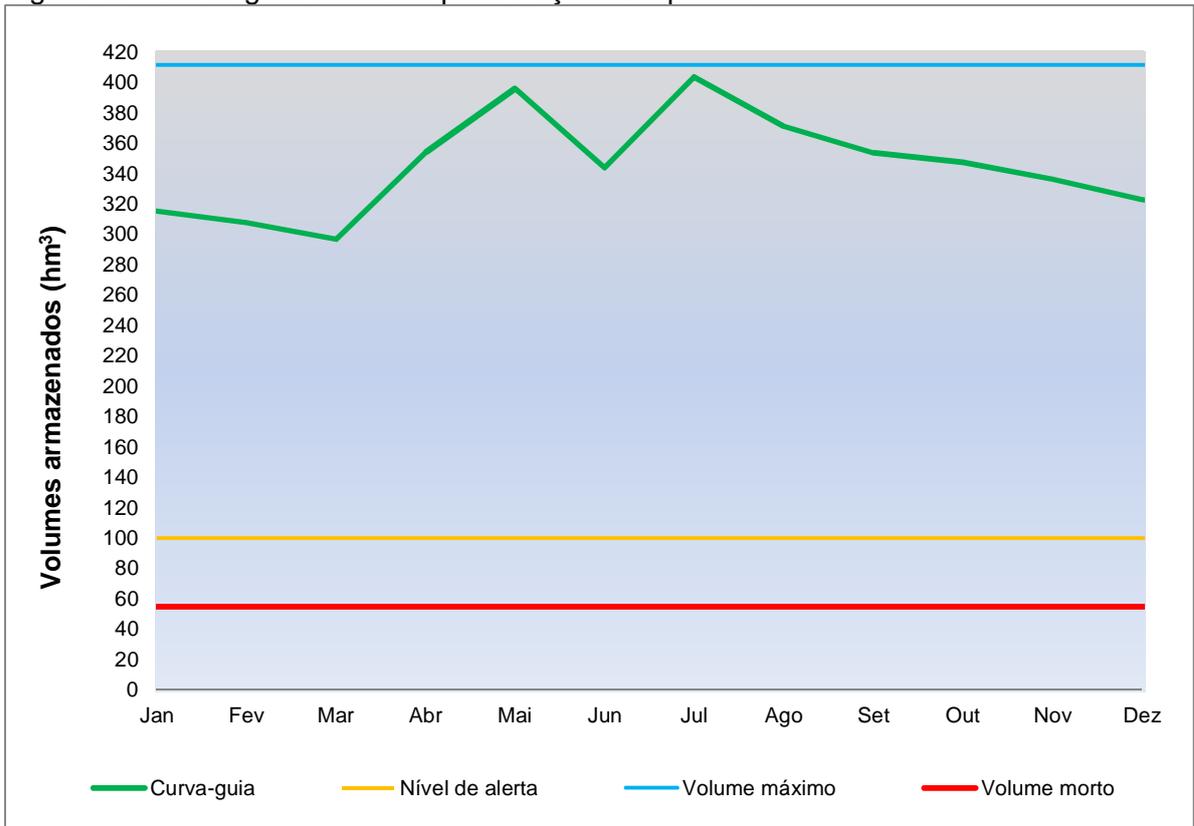
A FIG. 17 mostra a curva-guia gerada no processo de otimização e a FIG. 18 apresenta a mesma curva junto à curva-guia após a suavização. O resultado encontrado para as cotas da curva-guia é satisfatório, uma vez que, a forma da curva apresenta-se consistente com a realidade hidrológica da bacia.

Como as recargas em Boqueirão ocorrem, geralmente, entre os meses de fevereiro e abril, o reservatório deve estar, nos primeiros meses do ano, com o armazenamento baixo, uma vez que, o mesmo está sem recarga há vários meses. Neste período, a curva-guia deve também apresentar níveis mais baixos justificados pela alta probabilidade de ocorrência de afluências. Já nos meses de maio, junho e julho, após o fim da estação chuvosa, se espera que o reservatório tenha recebido recarga e esteja com um volume armazenado mais alto, o que justifica os níveis mais altos da curva-guia. Em outras palavras: se a afluência esperada no período anterior não tiver ocorrido, a curva-guia com níveis altos impedirá que se use um excedente do qual não se dispõe. Nos meses seguintes, como não há previsão de entradas, uma vez que o período de afluências na região já passou, a curva apresenta uma queda gradativa nos níveis, porquanto é momento de usar a água que foi armazenada nos períodos de chuva.

O nível da curva-guia referente ao mês de junho mostrou-se inconsistente, visto que, ocorre uma queda no nível que é incoerente com o restante da curva já que este se encontra entre dois picos (maio e julho), e também é incoerente com a realidade climatológica da bacia. Tal inconsistência se deve ao próprio processo numérico da otimização. Esta inconsistência foi corrigida no processo de suavização da curva. O mesmo ocorreu, em menor proporção, para o mês de março.

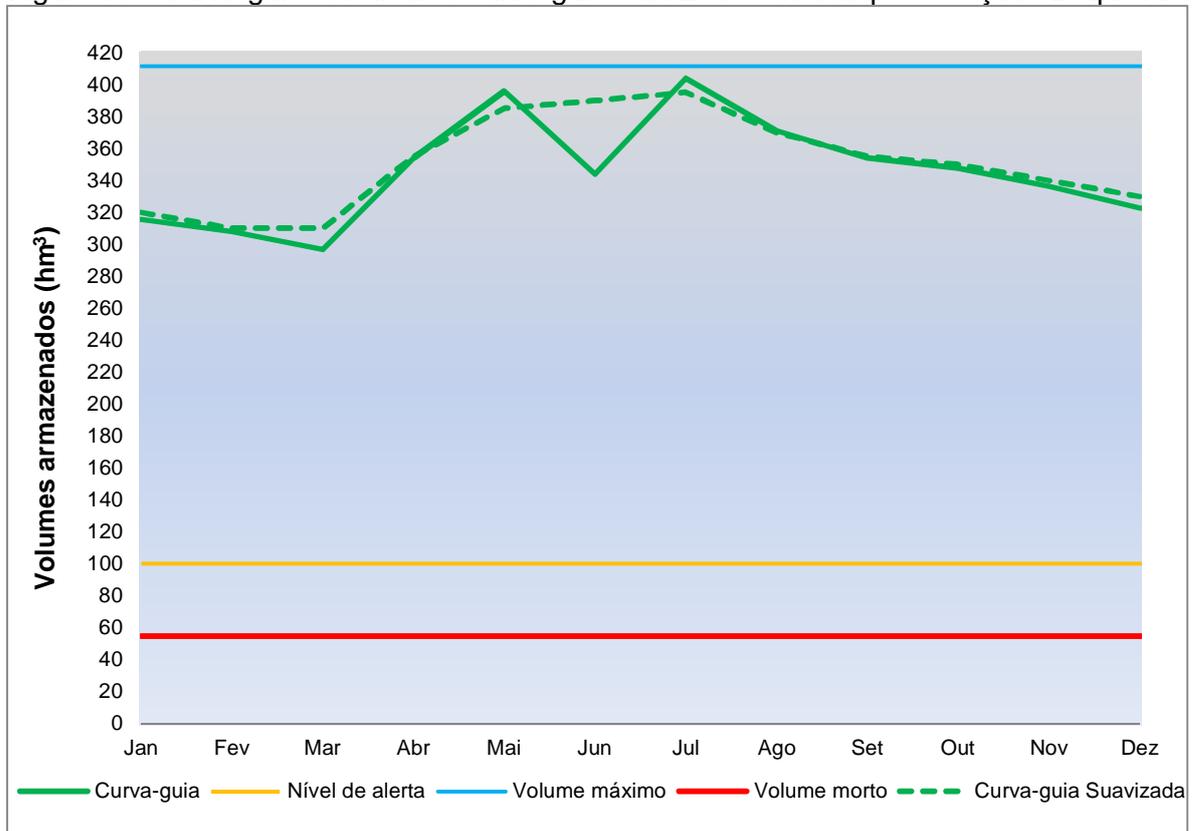
De acordo com os resultados encontrados no estabelecimento da Curva-Guia, o reservatório Boqueirão pode disponibilizar em períodos de abundância (quando o volume armazenado estiver acima da curva-guia) até $1,802 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão excedente máxima - Q_{em}), aproximadamente 46,5% a mais do que a vazão outorgável. Nos períodos em que o armazenamento estiver abaixo da curva, o valor a ser disponibilizado para retiradas deve ser igual a $1,23 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{out}).

Figura 17 - Curva-guia calculada para o açude Boqueirão



Fonte: a própria autora

Figura 18 - Curva-guia calculada e curva-guia suavizada adotada para o açude Boqueirão



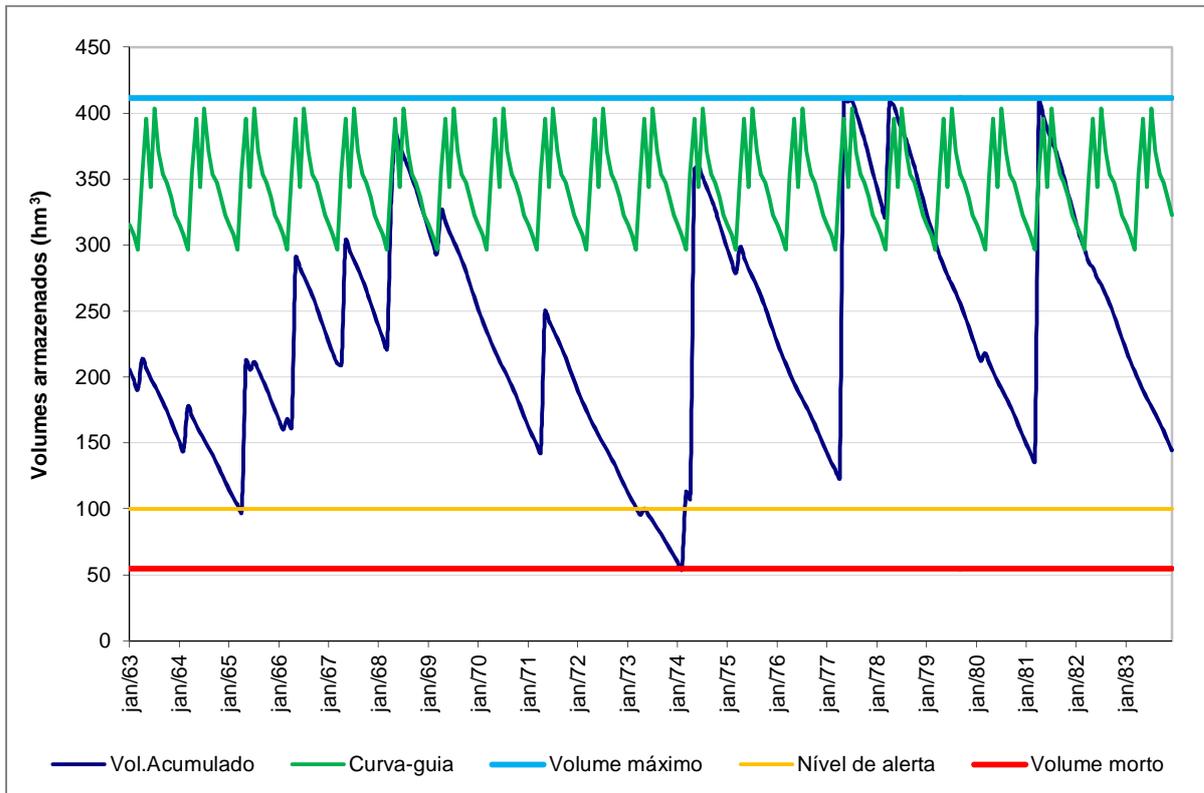
Fonte: a própria autora

5.2 Aplicações da Curva-guia a série de 1963 a 1983

As FIG. 19 e 20 mostram os resultados da simulação ao se aplicar a curva-guia originada pela otimização à série de anos usada no seu estabelecimento (1963-1983). Nesta série, ocorreram poucos anos com grandes afluências, resultando em, basicamente, dois episódios de aproveitamento da vazão excedente máxima (Qem): de 1977 a 1979, com uma pequena interrupção, e em 1981, também com uma interrupção durante o ano. Ocorreram também alguns episódios isolados, em 1968, 1974 e 1982. Em 34 dos 252 meses da simulação ocorreram retiradas da Qem ($1,802 \text{ m}^3/\text{s}$), equivalendo a 13% do total de meses da simulação. Com esta aplicação haveria um benefício de cerca de 50 milhões de m^3 , retirados além da vazão outorgável.

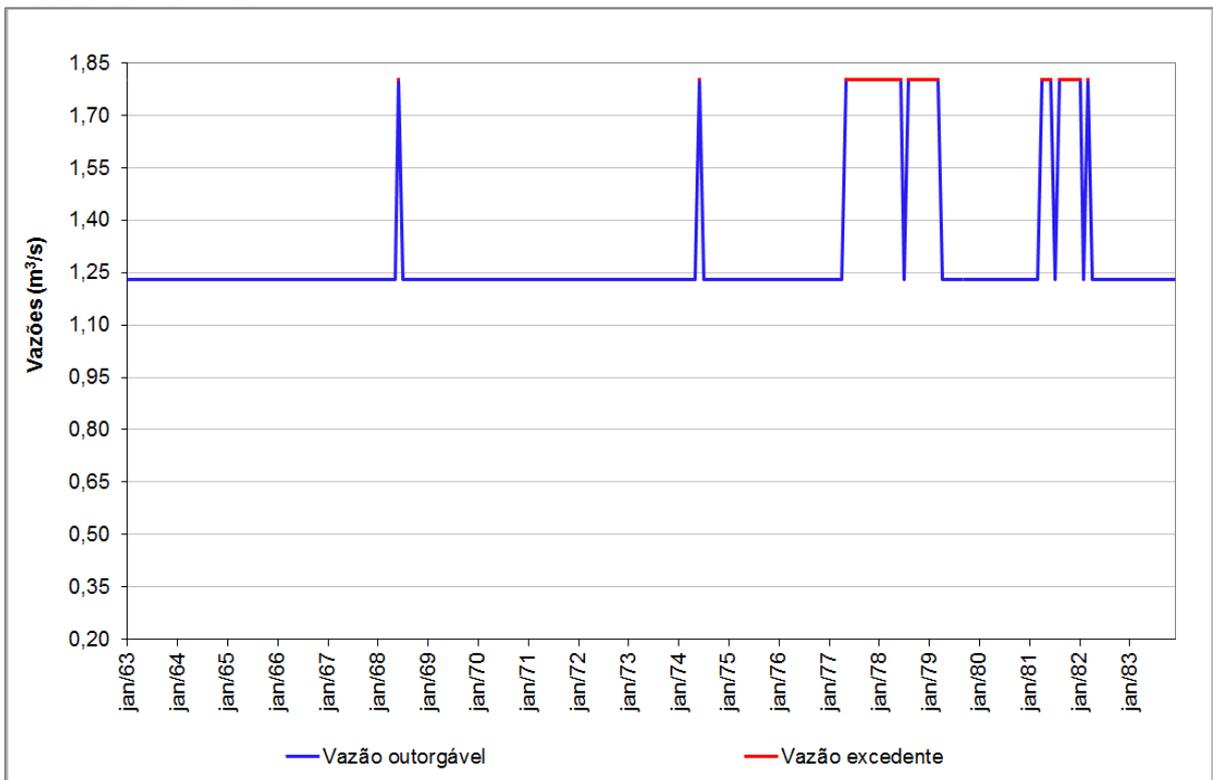
As FIG. 21 e 22 mostram os resultados da simulação ao se aplicar a curva-guia suavizada à série de anos usados no seu estabelecimento (1963-1983). Os dois episódios de aproveitamento da Qem se repetiram: de 1977 a 1979, com uma pequena interrupção, e em 1981, também com uma interrupção durante o ano. No entanto, os episódios isolados de aproveitamento da Qem não aconteceram após a suavização, sendo o número de meses reduzido para 27 (11% do total simulado). Os episódios isolados deixaram de ocorrer pois os mesmos se davam justamente nos meses que sofreram as maiores suavizações, março e junho. Tais baixas no aproveitamento da Qem não foram consideradas um prejuízo, uma vez que, por ocorrerem isoladamente, dificilmente essas retiradas seriam consideradas em uma rotina real de operação do reservatório. O benefício com a curva-guia suavizada foi de mais de 40 milhões de m^3 retirados além da vazão outorgável.

Figura 19 - Curva-guia original aplicada à série de 1963 a 1983: níveis e volumes armazenados



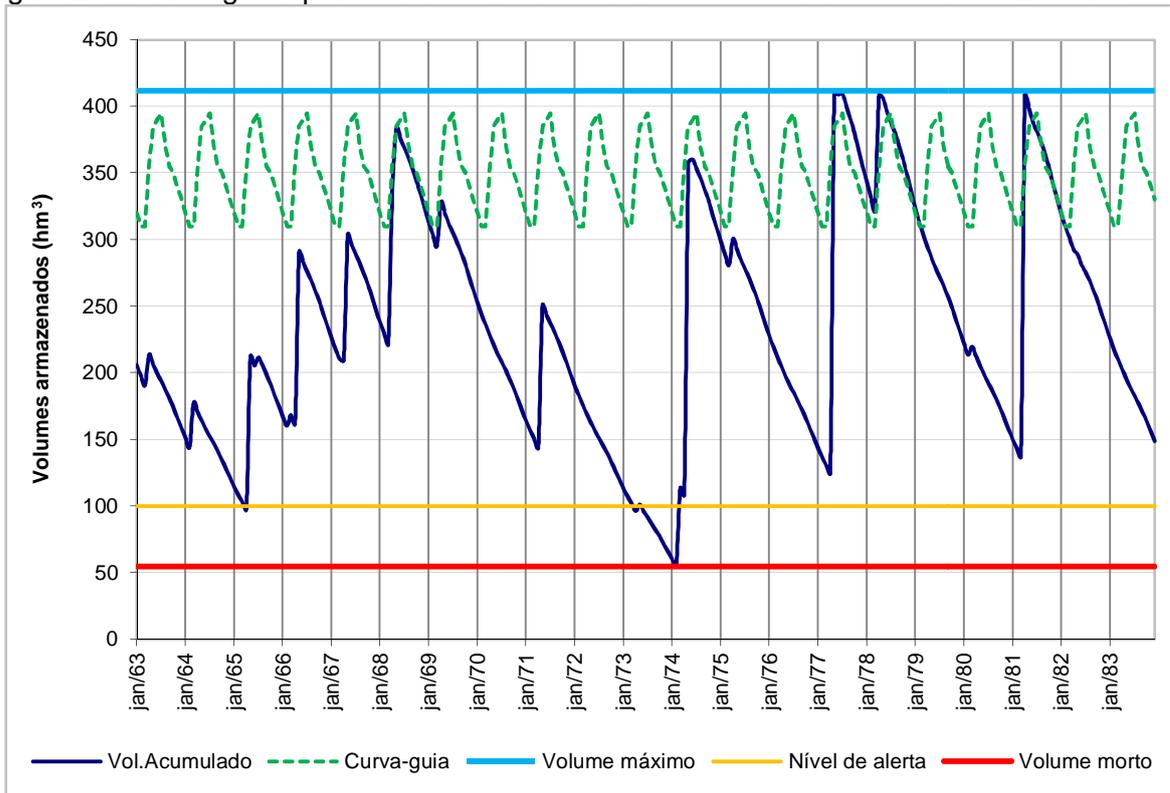
Fonte: a própria autora

Figura 20 - Curva-guia original aplicada à série de 1963 a 1983: vazões outorgável e excedente máxima



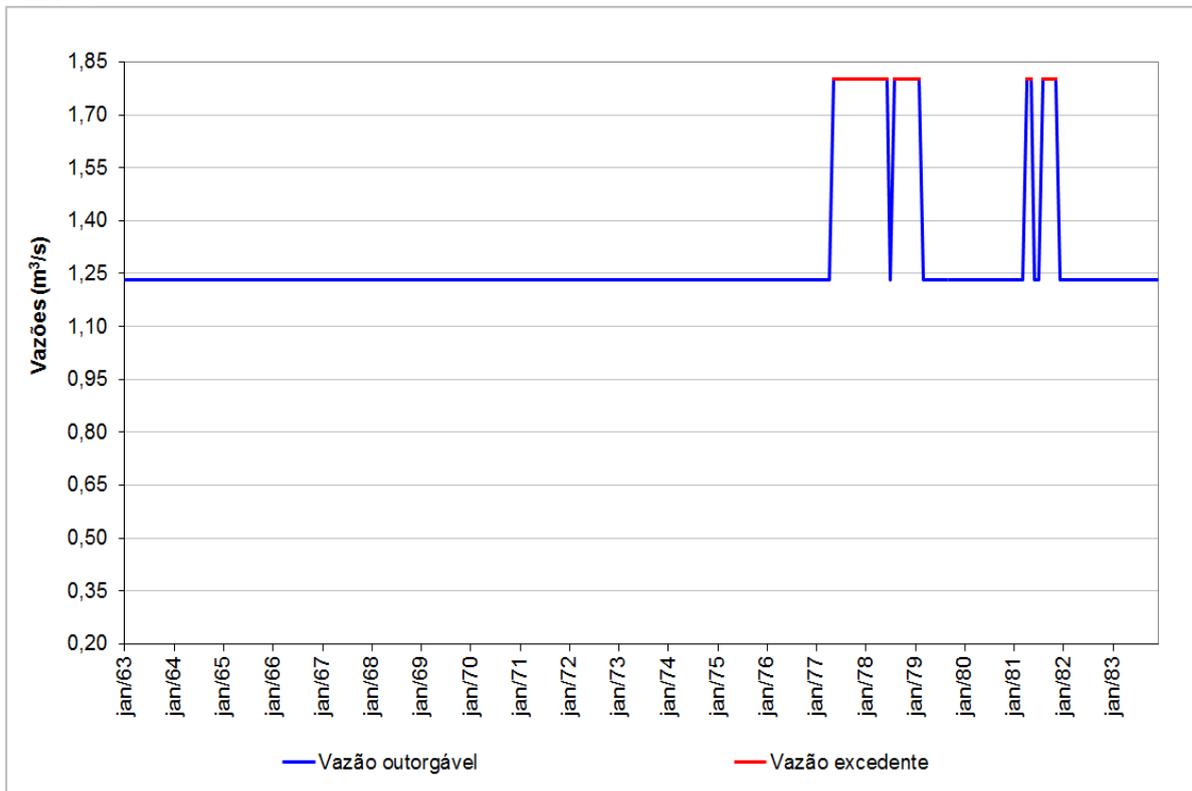
Fonte: a própria autora

Figura 21 - Curva-guia aplicada à série de 1963 a 1983: níveis e volumes armazenados



Fonte: a própria autora

Figura 22 - Curva-guia aplicada à série de 1963 a 1983: vazões outorgável e excedente máxima



Fonte: a própria autora

5.3 Aplicações da Curva-guia a série de 2004 a 2015

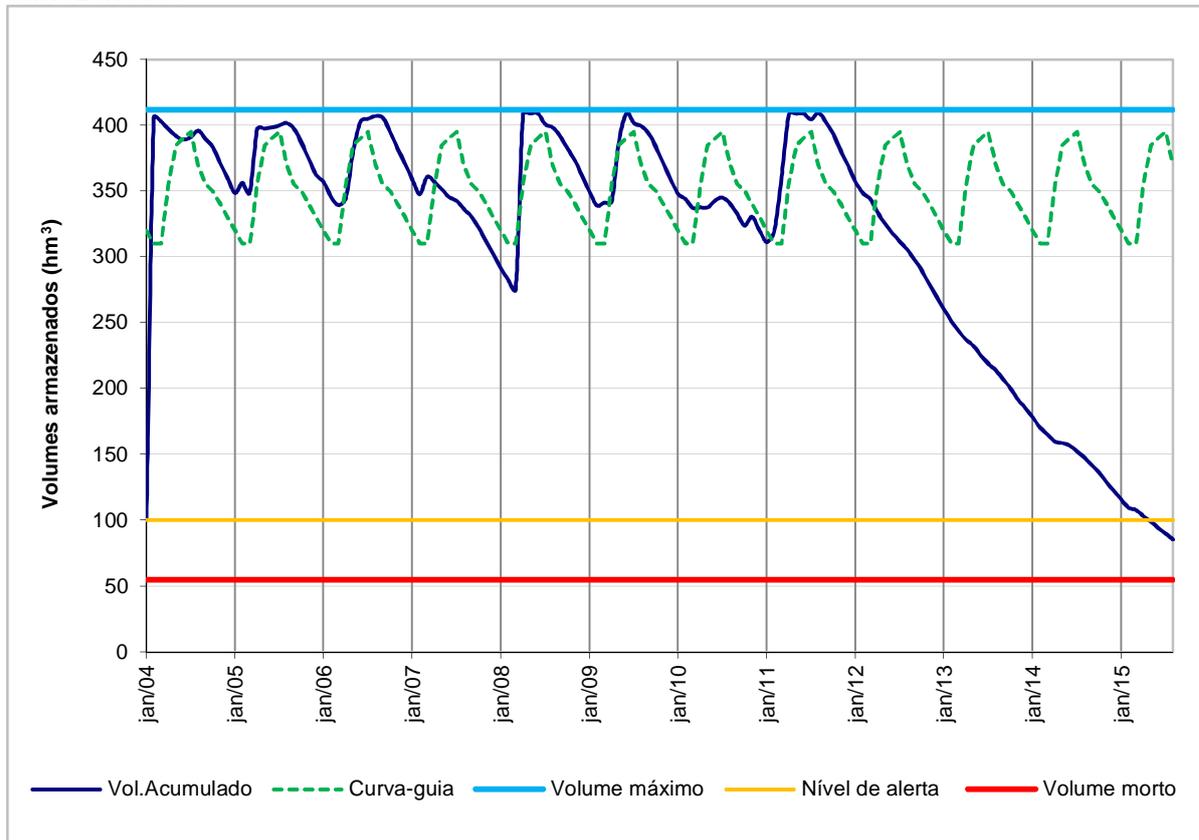
A fim de testar a curva-guia suavizada (chamada daqui para frente apenas de curva-guia) em período diverso daquele empregado no seu estabelecimento, foi considerada a série de afluições de 2004 a 2015. Conforme se vê na FIG. 13, na fase inicial (2004-2011) daquele período, houve predominância de grandes afluições ao reservatório. Nos últimos quatro anos (2012-2015), ocorreu uma sequência ininterrupta de baixas afluições e, conseqüentemente, uma queda gradativa do nível de água armazenado.

A FIG. 23 mostra os resultados da simulação da operação do reservatório, empregando a curva-guia no referido período 2004-2015. Verifica-se que entre 2004 e 2011, em 72% dos meses seriam efetuadas retiradas maiores do que a vazão outorgável. Se forem considerados os três primeiros meses de 2012, quando o nível do reservatório ainda estava acima da curva-guia, o aproveitamento da vazão excedente ocorreria em 75% dos 99 meses. Nesta fase, em quase todos os anos ocorreram grandes afluições e o nível de armazenamento se manteve na maior parte do tempo acima da curva-guia, de maneira que, a grande quantidade de água que foi extravasada na operação real (FIG. 13) ou se perdeu por evaporação poderia ter sido aproveitada, no todo ou em parte, para outros usos. Todavia, é importante observar que houve momentos em que foi necessária a limitação das retiradas à vazão outorgável (28% dos meses de 2004 a 2011, 25% se o primeiro trimestre de 2012 for considerado), até que o nível se elevasse novamente.

O benefício total do uso da Vazão Excedente Máxima - Qem (1,802 m³/s) pode ser observado na FIG. 24. Este volume adicional disponível totalizaria, entre 2004 e o início de 2012, aproximadamente 108 milhões de m³ (quantidade de água equivale a aproximadamente três anos de utilização da vazão outorgável - 1,23 m³/s), distribuídos em basicamente três episódios: de 2004 a 2007, com pequenas interrupções em 2004 e em 2006; de 2008 ao início de 2010 com uma pequena interrupção em 2009; e de 2011 ao início de 2012. Apenas nos anos de 2007 e 2010 ocorreram baixas afluições. Nestes dois anos, o nível armazenado no reservatório chegou a ficar abaixo da curva-guia, e a vazão retirada do reservatório foi limitada à vazão outorgável. Tais limitações evidenciam a importância de um acompanhamento contínuo da operação do reservatório por parte do órgão gestor, uma vez que, mesmo com a aplicação da curva-guia como ferramenta de operação, caso a

fiscalização não fosse feita, os usuários da outorga da vazão excedente poderiam continuar com o uso da água mesmo após o nível do reservatório ficar abaixo da curva-guia.

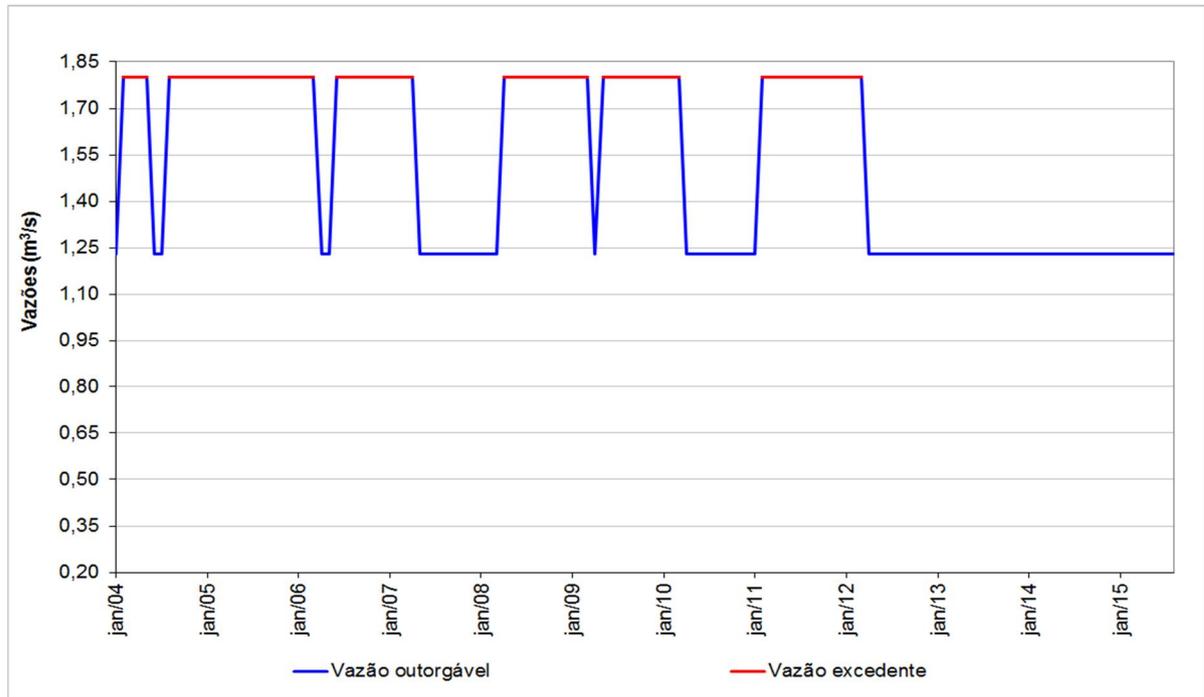
Figura 23 - Curva-guia suavizada aplicada à série de 2004 a 2015: níveis e volumes armazenados



Fonte: a própria autora

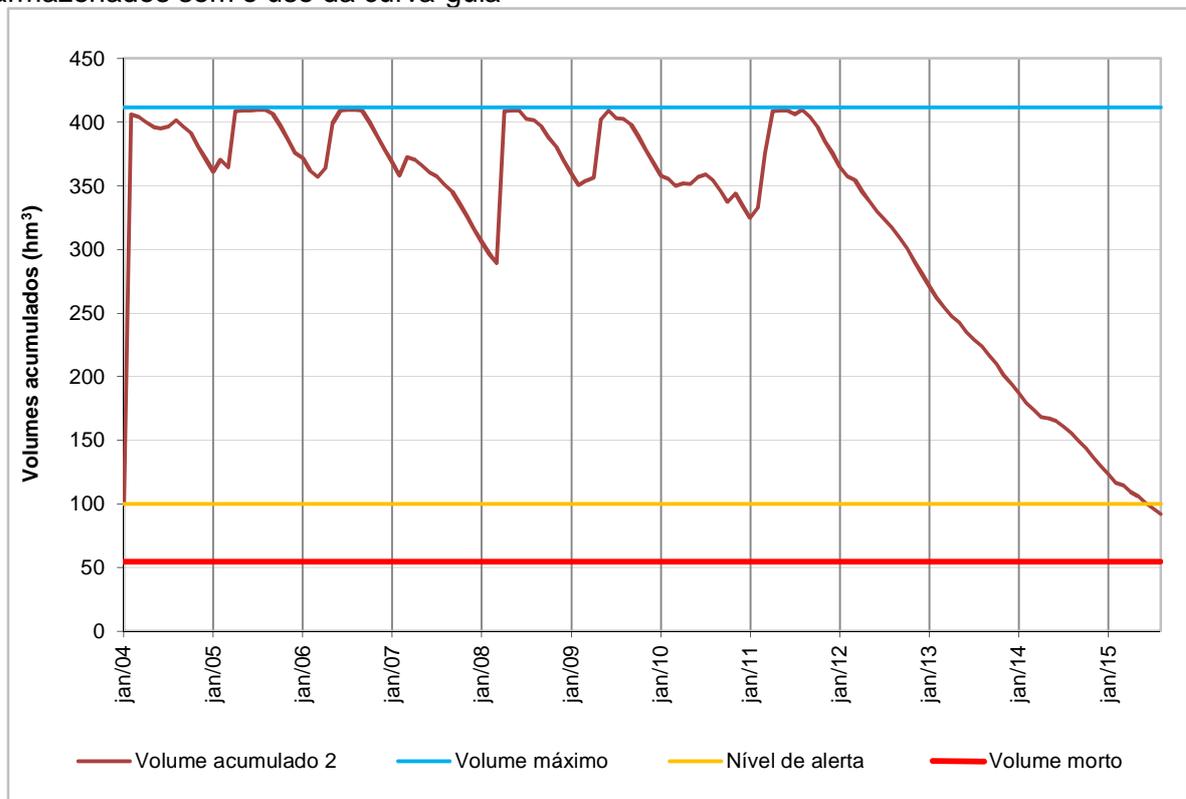
Com o intuito de quantificar o aproveitamento dos volumes vertidos e evaporados, foi também simulada a operação do reservatório sem a utilização da curva-guia, com o uso restrito apenas à Vazão Outorgável. Q_{out} ($1,23 \text{ m}^3/\text{s}$). A FIG. 25 mostra a simulação com a utilização apenas da Q_{out} , e o volume acumulado 2+ (linha bordô) mostra os níveis de armazenamento simulados. Por meio desta simulação, pode-se observar que o nível do reservatório chegaria cinco vezes à cota máxima, ocorrendo nestes episódios o extravasamento de água (vertimento).

Figura 24 - Curva-guia suavizada aplicada à série de 2004 a 2015: vazões outorgável e excedente máxima



Fonte: a própria autora

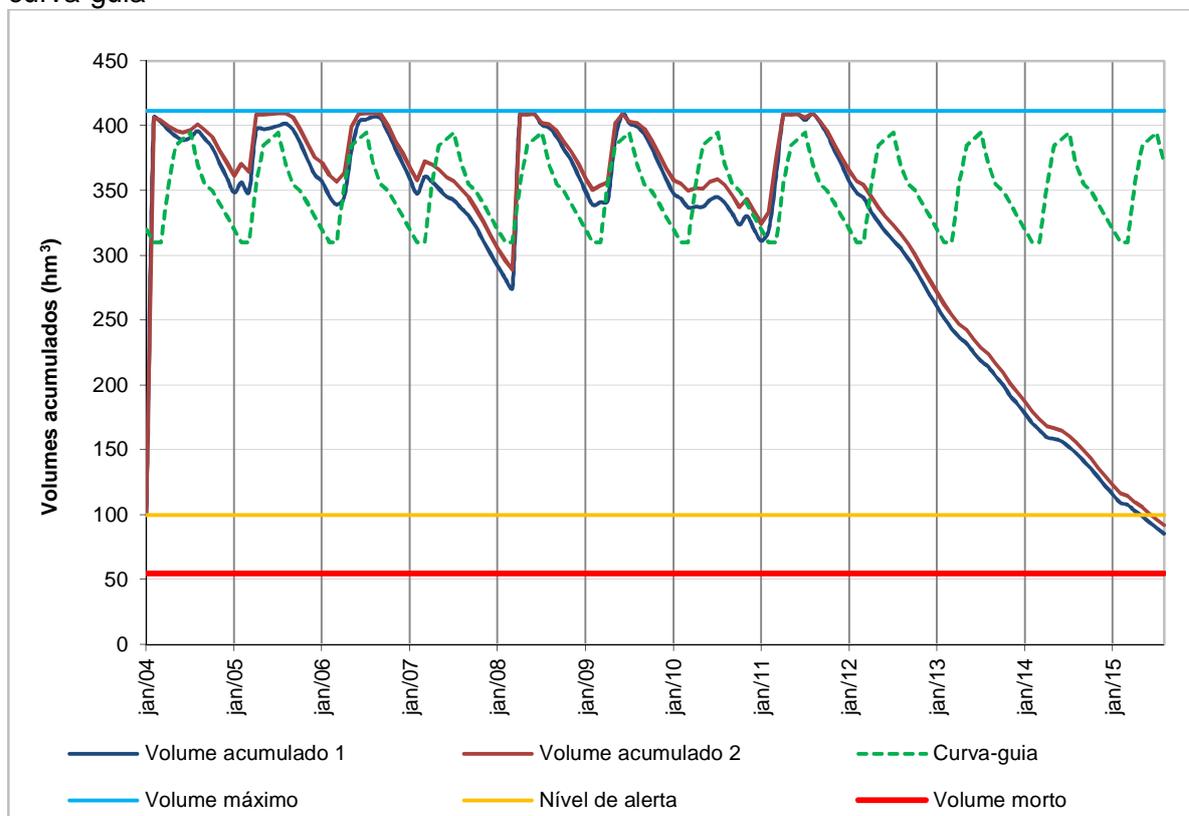
Figura 25- Simulação série de 2004 a 2015 com uso da vazão outorgável: níveis e volumes armazenados sem o uso da curva-guia



Fonte: a própria autora

A FIG. 26 traz as duas séries de níveis simuladas (com e sem a aplicação da curva-guia). No gráfico, a curva indicada por %volume acumulado 1+ representa os níveis simulados do reservatório com a utilização da curva-guia, enquanto %volume acumulado 2+aqueles sem a utilização da curva-guia (igualmente à FIG. 25). Pode-se notar que, em vários dos anos nos quais ocorreriam extravasamentos (2005, 2006, 2008, 2009 e 2011) quando o uso fosse limitado à Q_{out} , estes deixariam de acontecer com a aplicação da curva-guia (uso possível de Q_{em}), evidenciando o maior aproveitamento da água.

Figura 26 - Série de 2004 a 2015: níveis e volumes armazenados com e sem o uso da curva-guia



Fonte: a própria autora

Haveria, com a outorga temporária da Q_{em} , uma redução de mais de 88 milhões de m^3 de água extravasada e de mais de 13 milhões de m^3 de água evaporada, totalizando aproximadamente 102 milhões de m^3 , o que mostra que a quantidade de água adicional utilizada proveio preponderantemente (96%) dessas reduções do vertimento e da evaporação, não comprometendo, em geral o atendimento da vazão outorgável nas estações secas.

Todavia, ao fim de um longo período de estiagem, a operação com a curva-guia pode levar o volume remanescente no reservatório a níveis ligeiramente

inferiores aos que seriam atingidos sem o uso da mesma, conforme se vê na FIG. 26, nos anos de 2012 a 2015. Esta situação pode ser invertida ou, pelo menos, fortemente atenuada, através de uma gestão que incorpore, como elemento tático, a previsão climática regional. No caso exemplificado, a previsão de chuvas abaixo da média para o trimestre fevereiro-março-abril de 2012 (CPTEC, 2012) levaria ao abandono tático da indicação da curva guia e à adoção, já no início de 2012 da vazão outorgável como limite das retiradas do reservatório, o que, por sua vez propiciaria níveis remanescentes mais elevados.

Pode-se avaliar ainda outros benefícios da utilização da curva-guia comparando o cenário simulado (FIG. 23) com o real (FIG. 13). Neste caso, por exemplo, o reservatório Boqueirão estaria, em agosto de 2015, com aproximadamente 15 milhões de m³ acima do volume observado. Deve-se ressaltar que a simulação não incorpora o racionamento de água que ocorreu desde dezembro de 2014.

O nível de alerta a partir do qual se iniciou o racionamento em dezembro de 2014 (100 milhões de m³), seria atingido, com o uso da curva-guia, quatro meses mais tarde, em abril de 2015. A partir desta data, poderia ser adotado o racionamento e o reservatório estaria, em agosto de 2015, com um volume armazenado ainda maior que aquele mostrado na FIG. 23.

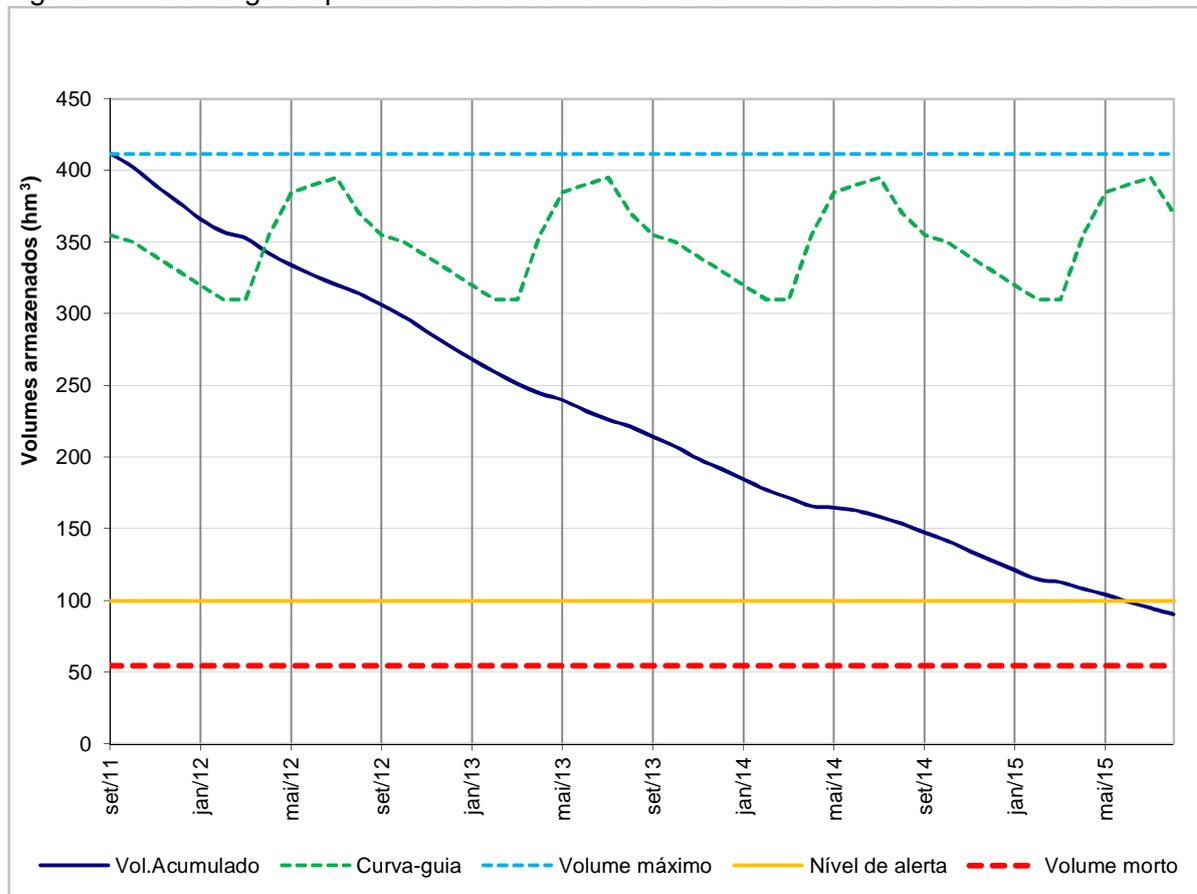
Uma outra simulação foi realizada, desta vez utilizando exclusivamente o período da crise, iniciando-se em setembro de 2011, quando o reservatório ainda estava cheio (último mês em que ocorreu vertimento), e indo até agosto de 2015 (FIG. 27). Vale salientar que esta crise vem se configurando como a mais grave de toda a história do reservatório uma vez que, nunca houve, nem na série 1963-1983, um período de quatro anos consecutivos com afluições tão baixas.

Este outro cenário simulado apresenta resultados muito semelhantes aos encontrados com a operação para todo o período (2004-2015), mostrada na FIG. 23. Esta semelhança se deve ao fato de o ano de 2011 ter sido um ano com afluições excepcionais, ocorrendo vertimento até a segunda quinzena do mês de setembro, fazendo com que a operação para este cenário (de setembro de 2011 a agosto de 2015) não fosse prejudicada pelo uso de água em excesso que ocorrera nos meses e anos anteriores na operação real. A FIG. 28 mostra o uso da Qem ainda nos últimos meses de 2011 e início de 2012 e, deste então, o atendimento seria limitado

à vazão outorgável, uma vez que, não houve recuperação do volume armazenado em nenhum dos anos.

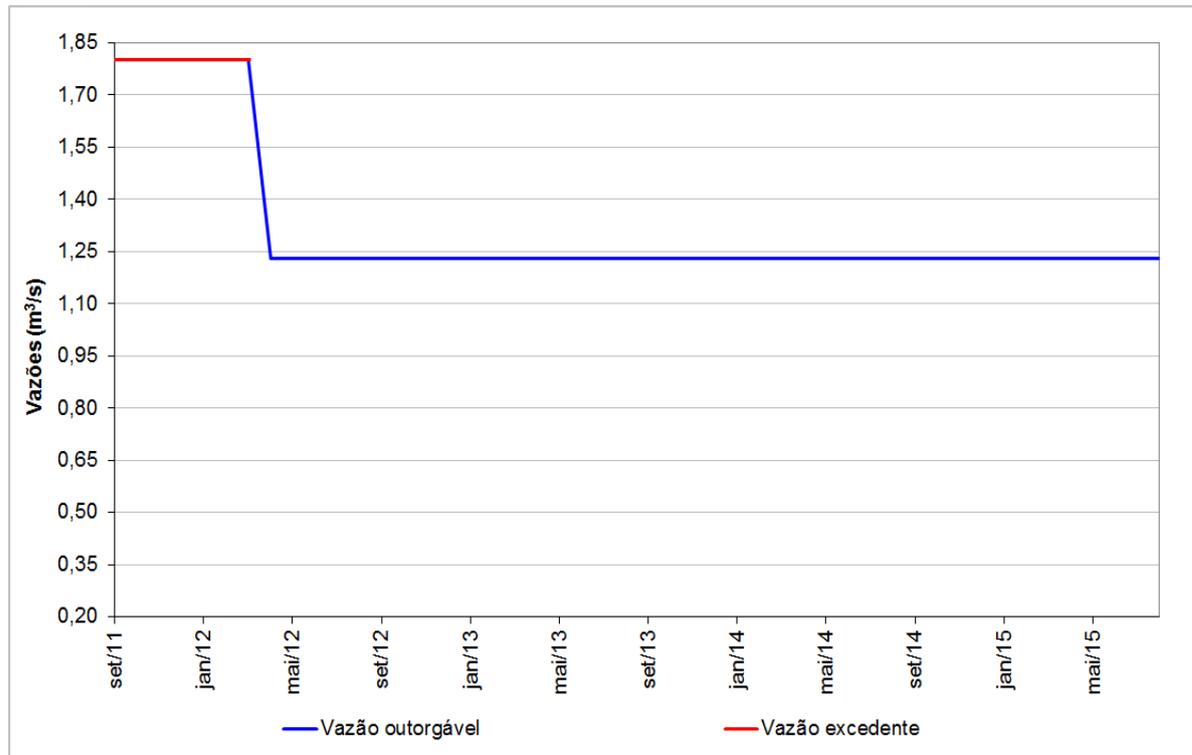
Com esta operação, mesmo com a utilização da Qem até março de 2012, o nível de alerta do reservatório (100 milhões de m³) seria atingido apenas em junho de 2015, adiando o racionamento do uso da água em seis meses. O volume armazenado no reservatório no início de agosto seria de mais de 90 milhões m³, cerca de 20 milhões de m³ acima do nível real medido.

Figura 27 - Curva-guia aplicada à série de 2011 a 2015: níveis e volumes armazenados



Fonte: a própria autora

Figura 28 - Curva-guia aplicada à série de 2011 a 2015: vazões outorgável e excedente máxima



Fonte: a própria autora

Os resultados encontrados com a utilização da curva-guia para auxílio na tomada de decisões referentes à operação do açude Boqueirão e à implantação do instrumento outorga mostram que, mesmo com uma ferramenta simples, como é o caso da curva-guia, se poderia melhorar a operação do reservatório, desde que fosse realizado o devido acompanhamento/fiscalização desta operação.

Com uma gestão de recursos hídricos contínua (desenvolvida tanto em ciclos de anos secos quanto chuvosos) e eficiente, as crises do reservatório poderiam ser evitadas ou atenuadas, propiciando um maior conforto e segurança à população abastecida pelo açude Boqueirão, bem como, evitando grandes prejuízos ao comércio e às indústrias que dependem do reservatório.

A operação do reservatório utilizando a curva-guia para exploração da vazão excedente poderia ser usada para reduzir os conflitos pelo uso da água por parte dos usuários que, devido à pequena disponibilidade de água do reservatório, não podem ser atendidos pela vazão outorgável, de forma que estes possam, em períodos de alto armazenamento, ser abastecidos, sem que os usos prioritários sejam comprometidos no caso da ocorrência de um novo ciclo seco.

5 CONCLUSÕES

Com a gestão dos recursos hídricos sendo realizada eficientemente, limitando as retiradas do reservatório às vazões outorgadas, fiscalizando tais retiradas, inclusive nos anos de maiores afluências, respeitando as determinações da lei 9.433/1997 e o PERH-PB, o açude Boqueirão estaria com um volume de água armazenado menos preocupante e menos próximo do colapso no abastecimento público de água.

Os resultados confirmam a hipótese de que, em regiões com alta variabilidade hidrológica, que utilizam reservatórios plurianuais com baixas vazões de regularização, é possível usar, em períodos de maiores afluências, a água que extravasaria por vertimento ou seria abstraída por evaporação, aumentando assim, sazonalmente, a vazão outorgável.

A otimização dos níveis da curva-guia mostrou-se consistente, apresentando resultados coerentes, que correspondem à climatologia da bacia na qual o reservatório está inserido.

A ferramenta curva-guia, de extrema simplicidade conceitual e operacional, mostrou-se apropriada para ser utilizada na operação de reservatórios com esta finalidade, apresentando resultados satisfatórios e consistentes.

As retiradas das vazões excedentes como complemento à vazão outorgável não comprometem o atendimento desta em períodos de escassez hídrica, uma vez que estas retiradas adicionais utilizam quase que exclusivamente a água que seria extravasada ou perdida por evaporação.

A curva-guia, assim construída, pode ser utilizada para auxiliar na implantação do instrumento da outorga por meio da sua expansão variável sazonalmente, podendo esta expansão ser direcionada às demandas não atendidas pela vazão outorgável.

Como continuação desta pesquisa, é recomendável que sejam adicionados níveis de alerta ao modelo, de forma que, em ciclos mais longos de estiagem, possa ser considerado o racionamento no abastecimento urbano.

É aconselhável também que seja adicionada ao modelo a previsão climática, de forma que a curva-guia possa variar de acordo com esta previsão, de modo que as limitações nas retiradas possam ser antecipadas ao sinal de um novo ciclo seco.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AESA . Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**. João Pessoa, 2006.
- AESA . Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Mapas**. Disponível em:
<<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas.html>>. Acesso em: 13 jun. 2015.
- ANA . Agência Nacional de Águas. **ANA define regras emergenciais de uso em rios e açudes no semiárido por causa da seca**. Disponível em:
<http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12402>. Acesso em 10 jan. 2015.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Resolução ANA nº 467**, 30 de outubro de 2006. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2006/467-2006.pdf>>. Acesso em 14 ago. 2015.
- ANA - Agência Nacional de Águas; AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Resolução conjunta ANA e AESA-PB nº 960**, 17 de agosto de 2015. Diário Oficial da União, 18 de agosto de 2015.
- ASFORA, M. C.; CIRÍLO, J. A. **Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias**. REGA, v. 2, n. 2, p. 27-38, 2005.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Senado Federal. Centro Gráfico. Brasília, DF. 1988.
- BRASIL. **Lei nº 9.433**, 8 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/leis/L9433.htm>. Acesso em 05 ago. 2014.
- BRASIL. **Lei nº 9.984**, 17 de julho de 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9984.htm>. Acesso em 23 jul. 2015.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V.; TUCCI, C. E. M. **Otimização de Regras de Operação de Reservatórios Utilizando um Algoritmo Evolutivo**. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba. 2006.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PILAR, J. V. **Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n.1, p. 181-196. 2008.
- CHANG, L.; HO, C.; CHEN, Y. **Applying Multiobjective Genetic Algorithm to Analyze the Conflict among Different Water Use Sectors during Drought**

Period. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 136, n. 5, p. 539-546. 2010.

CHEN, L. **Real Coded Genetic Algorithm Optimization of Long Term Reservoir Operation.** Journal of the American Water Resources Association, v. 39, n. 5, p. 1157-1165. 2003.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais.** Editora ABRH. 2013.

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Previsão de chuvas abaixo da normal no Nordeste e acima da normal no Norte do Brasil.** Infoclima de 23 de janeiro de 2012. Ano 19, n.1.

DNOCS . Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Boqueirão de Cabaceiras.** Disponível em:

<<http://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>>. Acesso em 20 jun. 2015.

DNOCS . Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Apresentação.** Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br> >. Acesso em 07 ago. 2015.

FARIAS, C. A. S. **Derivation of hedging rules and forecasts by artificial neural networks for optimal real-time management of an integrated water resources system.** Ph.D. Thesis. Ehime University - Matsuyama. Japan. 2009

FUSP - Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo. **Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê - Relatório Final.** São Paulo, 2009.

GALVÃO, C. O.; MEDEIROS, P. C. M.; OLIVEIRA, K. F. **Hidro Ë Versão 2-4.** Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2004.

LEE, S.; FITZGERALD, C. J.; HAMLET, A. F.; BURGESS, S. J. **Daily Time-Step Refinement of Optimized Flood Control Rule Curves for a Global Warming Scenario.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 137, n. 4, p. 309-317. 2011.

LIMA, G.; BOLDRIN, R. S.; CASTRO, M. A. S.; SOUZA, M. P.; MAUAD, F. F. **Critérios técnicos para outorga de direito de uso de recursos hídricos.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. 2005.

LOUCKS, D. P.; BEEK, E. V. **Water Resources Systems Planning and Management: Na Introduction to Methods, Models and Management.** Studies and Reports in Hydrology. UNESCO Publishing. 2005.

- LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A.. **Water Resources Systems Planning and Analysis**. Prentice Hall. Englewood Cliffs. USA. 1981.
- MAASS, A.; HUFSCHMIDT, M. M.; DORFMAN, R.; THOMAS, H. A.; MARGLIN, S. A.; FAIR, G. M. **Design of water-resource systems**. Harvard University Press, Cambridge. 1962.
- MACHADO, E. C. M. N.; GALVÃO, C. O.; FILHO, F. A. S. **Alocação Quali-quantitativa de Águas em Bacias Hidrográficas: Metodologia Multiobjetivo Inserida no Contexto da Gestão dos Recursos Hídricos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 2, p. 213-227. 2012.
- MAMEDE, G. L.; MEDEIROS, P. H. A. **Variabilidade da Curva de Garantia de Oferta Hídrica para Diferentes Intervalos de Simulação: O caso do Reservatório Orós**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande. 2009.
- MELO, C. R. **Análise do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco Face aos Cenários de Uso Previstos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco . UFPE. Recife. 2011.
- MINISTÉRIO PÚBLICO DA PARAÍBA/Promotoria de Defesa do Meio Ambiente e Patrimônio Social. **Inquérito Civil Público nº 064/2012**. Campina Grande. 2012.
- NEIRA, K. L. **Curvas de Regularização para Reservatórios Parcialmente Cheios e Confiabilidade Constante**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná . UFPR. Curitiba. 2005.
- NUNES, T. H. C.; LOURENÇO, A. M. G.; CARNEIRO, T. C. C.; LOURENÇO, D. A. L.; FARIAS, C. A. S. **Algoritmos Genéticos para Otimização Multiobjetivo do Sistema Hídrico Coremas - Mãe D'Água**. In: XXXIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental . AIDIS. Salvador. 2012.
- 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 ÍCLASSE AÎ nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 73-83. 2005.
- PALISADE CORPORATION. **Evolver: Solver de Algoritmo Genético para Microsoft Excel**. Manual do Usuário, Versão 6. 2013.
- PARAÍBA. **Lei Estadual nº 6.308**, 02 de julho de 1996. Disponível em: <[http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/leis/estadual/Lei_n_6.308_96_Politica_Estadu al_Atualizada.pdf](http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/leis/estadual/Lei_n_6.308_96_Politica_Estadu_al_Atualizada.pdf)>. Acesso em 20 jun. 2015.

- RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; NUNES, T. H. C. **Novas considerações sobre a gestão dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa - A seca 2012-2014.** In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal. 2014.
- RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; VIEIRA, Z. M.C.L.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; SOUZA, J. A. **Atribuições e responsabilidades na gestão dos recursos hídricos Ë O caso do açude Epitácio Pessoa/Boqueirão no Cariri paraibano.** In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves. 2013.
- RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; GALVÃO, C. O. **Participação da Sociedade na crise 1998-2000 no abastecimento d'água de Campina Grande-PB.** In: Proceedings of the Fourth Inter-American Dialogue on Water Management. Foz do Iguaçu. 2001.
- RÊGO, J.C.; GALVÃO, C.O.; ALBUQUERQUE, J.P.T. **Considerações sobre a gestão dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa Ë Boqueirão na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba em cenário de vindouros anos secos.** In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa. 2012.
- REVELLE, C.; JOERES, E.; KIRBY, W. **The linear decision rule in reservoir management and design: 1, development of the stochastic model.** Water Resources Research, v. 5, n. 4, p. 767-777. 1969.
- RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. L. **A Outorga Integrada das Vazões de Captação e Diluição.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 3, p. 151-168. 2003.
- SARGENT, D. M. **Reservoir operating rules for drought conditions.** Hydrological Sciences. v. 24, n. 1, p. 83-94. 1979.
- SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R. A. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: Uma das possíveis abordagens.** In: Machado, C. J. S. (Org.) - Gestão de Águas Doces. Interciência, v. 1, p. 135-178. Rio de Janeiro. 2004.
- SILVA, R. P. **Hidro - Versão original.** Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba e Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos Minerais da Paraíba. Campina Grande, 1997.
- STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. **Incertezas nas estimativas da vazão regularizada por um reservatório.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 6, n. 3, p. 81-94. 2001.

- TAGHIAN, M.; ROSBJERG, D.; HAGHIGHI, A.; MADSEN, H. **Optimization of Conventional Rule Curves Coupled with Hedging Rules for Reservoir Operation**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 140, n. 5, p. 693-698. 2014.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª Edição. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005.
- UFPB/ATECEL. **Plano estadual e sistema de gerenciamento de recursos hídricos; potencialidades hídricas superficiais do Estado da Paraíba; relatório conclusivo**. João Pessoa: SEPLAN/PB, 1994.
- VEIGA, L. B. E.; MAGRINI, A. **The Brazilian Water Resources Management Policy: Fifteen Years of Success and Challenges**. Water Resour Manage, v. 27, n. 7, p. 2287-2302. 2013.
- VIEIRA, Z. M. C. L.; RIBEIRO, M. M. R. **A Gestão de Recursos Hídricos no Estado Da Paraíba: Aspectos legais e institucionais**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo. 2007.
- YEH, W. W.-G. **Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review**. Water Resources Research, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, 1985.
- ZHOU, Y.; GUO, S. **Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaptation to climate change**. Journal of Hydrology, v. 498, p. 153-164, 2013.