

AGEVAP

**ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAÍBA DO SUL**

Serviço

Estudo de atualização do quadro de demandas hídricas e atualização dos balanços hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Relatório

Produto 5 – Histórico e diagnóstico das regras operativas das UHEs do Sistema Hidráulico da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Outubro, 2025
Revisão 2

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE QUADROS	4
LISTA DE SIGLAS	5
1. APRESENTAÇÃO	7
2. OBJETIVOS	8
3. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA	9
4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA HÍDRÁULICO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	11
4.1. DESCRIÇÃO GERAL	11
4.2. TRANSPOSIÇÕES	14
4.2.1. Transposição Sistema Guandu	17
4.2.2. Transposição Jaguari – Atibainha	19
4.3. CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA E SAZONAL DAS VAZÕES	21
4.3.1. Comportamento geral da série histórica	21
4.3.2. Sazonalidade do regime de vazão	24
4.4. HISTÓRICO DA OPERAÇÃO E CRISE HÍDRICA 2014-2015.....	28
4.4.1. Evolução dos volumes armazenados.....	28
4.4.2. Histórico das Condicionantes de Operação	32
5. AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015.....	41
5.1. ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO DOS VOLUMES DO SISTEMA.....	41
5.2. ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA	42
6. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE A OPERAÇÃO DO SISTEMA HÍDRICO PARAÍBA DO SUL ..	48
6.1. ESTUDO 1 - REGRAS DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL / SISTEMA GUANDU (FREITAS, 2004)	48
6.2. ESTUDO 2 - AVALIAÇÃO DE OPERAÇÕES ALTERNATIVAS PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL (MELO, 2017).....	50
6.3. ESTUDO 3 - SEGURANÇA HÍDRICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL (PAIVA, 2020) ...	59
6.4. ANÁLISE CRÍTICA DOS ESTUDOS SOBRE REGRAS OPERATIVAS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL	60
7. DIRETRIZES PARA ESTUDOS SOBRE REGRAS OPERATIVAS NA BACIA	63
7.1. SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO PARA A RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015	63

7.2.	ELABORAÇÃO DE MODELO OPERACIONAL DA BHPS	64
7.2.1.	MODELOS SUGERIDOS	64
7.2.2.	DADOS DE ENTRADA NECESSÁRIOS	65
7.2.3.	CALIBRAÇÃO DO MODELO A PARTIR DE SIMULAÇÃO DAS REGRAS EXISTENTES	66
7.2.4.	SIMULAÇÃO DAS REGRAS DA RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015.....	66
7.3.	PROPOSIÇÃO DE NOVOS CENÁRIOS DE REGRAS OPERACIONAIS	67
7.3.1.	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS OPERACIONAIS ALTERNATIVOS	67
7.3.2.	CENARIZAÇÃO COM ALTERAÇÕES NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E DEMANDA ..	69
7.4.	REGRAS DE OPERAÇÃO ACOPLADA À PREVISÃO DE VAZÃO SUB-SAZONAL E SAZONAL ..	70
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
9.	REFERÊNCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 – FLUXOGRAMA DE PROCESSO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.	10
FIGURA 4-1 – LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS E TRANSPOSIÇÕES DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	13
FIGURA 4-2 – ESQUEMA GERAL DAS TRANSPOSIÇÕES DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL	15
FIGURA 4-3 – ESQUEMA GERAL DO PERCURSO DOS PRINCIPAIS RIOS E RESERVATÓRIOS DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL.....	16
FIGURA 4-4 – LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA GUANDU	17
FIGURA 4-5 – ESQUEMA GERAL DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS DOS RIOS PARAÍBA DO SUL, PIRAI E RIBEIRÃO DAS LAJES.....	18
FIGURA 4-6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA GUANDU.....	18
FIGURA 4-7 – LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA JAGUARI - ATIBAINHA	20
FIGURA 4-8 – INTERLIGAÇÃO DO SISTEMA JAGUARI-ATIBAINHA.....	21
FIGURA 4-9 – SÉRIE HISTÓRICA DE VAZÕES NOS PONTOS AVALIADOS	22
FIGURA 4-10 – VARIABILIDADE INTERANUAL (ADIMENSIONAL) NOS PONTOS AVALIADOS.....	23
FIGURA 4-11 – SAZONALIDADE DAS VAZÕES (AFLUENTES E NATURAIS) E VOLUMES ÚTEIS DOS PONTOS AVALIADOS	26
FIGURA 4-12 – SÉRIE TEMPORAL DO VOLUME ÚTIL ARMAZENADO, EM RELAÇÃO AO VOLUME ÚTIL TOTAL DO RESERVATÓRIO EQUIVALENTE.....	29
FIGURA 4-13 – SÉRIES HISTÓRICAS DIÁRIA DE VOLUME ÚTIL ARMAZENADO EM CADA RESERVATÓRIO.....	30
FIGURA 4-14 – MÉDIAS ANUAIS DOS VOLUMES ÚTEIS PARA OS QUATRO RESERVATÓRIOS ANALISADOS E O RESERVATÓRIO EQUIVALENTE.....	31
FIGURA 5-1 – CURVA DE SEGURANÇA DE ARMAZENAMENTO PARA A OPERAÇÃO NORMAL DO SISTEMA HIDRÁULICO DO PARAÍBA DO SUL (2025) E ARMAZENAMENTO EQUIVALENTE ANO A ANO APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DA RESOLUÇÃO 1382/2015	41
FIGURA 5-2 – GERAÇÃO DE ENERGIA DIÁRIA 2000-2024 E SUAS MÉDIAS NOS RESERVATÓRIOS DA CASCATA DO PARAÍBA DO SUL.....	45
FIGURA 5-3 – CURVAS DE PERMANÊNCIA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DIÁRIA E VOLUME ÚTIL DOS RESERVATÓRIOS DA CASCATA DO PARAÍBA DO SUL	46
FIGURA 6-1 – REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS (AQUANET) DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL DESENVOLVIDO POR FREITAS (2004)	49
FIGURA 6-2 – VAZÃO FIRME DO RESERVATÓRIO PARAIBUNA E DO RESERVATÓRIO JAGUARI.	49
FIGURA 6-3 – MODELO WEAP DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL DESENVOLVIDO POR MELO (2017).	50
FIGURA 6-4 – CURVA-GUIA PARA O RESERVATÓRIO DE JAGUARI ELABORADA POR MELO (2017)	52
FIGURA 6-5 – CRIAÇÃO DE UM PONTO DE DEMANDA PARA SIMULAR A RETIRADA DE ÁGUA PARA ATIBAINHA NO WEAP ELABORADO POR MELO (2017)	53
FIGURA 6-6 – VOLUME ARMAZENADO PARA OS TRÊS CENÁRIOS SIMULADOS POR MELO (2017).....	54

FIGURA 6-7 – VOLUME ARMAZENADO PARA OS TRÊS CENÁRIOS DURANTE A CRISE DE 2014 – 2015, SIMULADOS POR MELO (2017).....	54
FIGURA 6-8 – GERAÇÃO DE ENERGIA ANUAL, SIMULADA POR MELO (2017).....	55
FIGURA 6-9 – COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA REALIZADA POR MELO (2017).....	56
FIGURA 6-10 – CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÃO MÉDIA MENSAL AFLUENTE EM SANTA CECÍLIA, SIMULADA POR MELO (2017).....	56
FIGURA 6-11 – VOLUME ARMAZENADO PARA OS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DA TRANSPOSIÇÃO PARA ATIBAINHA, SIMULADO POR MELO (2017).....	57
FIGURA 6-12 – VOLUME ARMAZENADO PARA OS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DA TRANSPOSIÇÃO PARA ATIBAINHA DURANTE A CRISE HÍDRICA, SIMULADO POR MELO (2017).....	57
FIGURA 6-13 – GERAÇÃO DE ENERGIA ANUAL PARA AS SIMULAÇÕES COM RETIRADA DE ÁGUA PARA ATIBAINHA, SIMULADA POR MELO (2017).....	58
FIGURA 6-14 – CURVA DE PERMANÊNCIA EM SANTA CECÍLIA PARA OS CENÁRIOS DE TRANSPOSIÇÃO, SIMULADA POR MELO (2017).....	59
FIGURA 7-1 – REGIME DE VAZÃO NATURAL DIÁRIO NOS RESERVATÓRIOS DO SISTEMA PARAÍBA DO SUL, NO PERÍODO DE 1993-2024. AMPLITUDE MÁXIMA CONSIDERADA COMO PERCENTIL 90 E MÍNIMA COMO PERCENTIL 10.....	68
FIGURA 7-2. FLUXOGRAMA PARA DEFINIÇÃO DE REGRAS OPERATIVAS	69

LISTA DE QUADROS

QUADRO 4-1 – PRINCIPAIS APROVEITAMENTOS LOCALIZADOS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL E DADOS OPERATIVOS	12
QUADRO 4-2 – TRANSPOSIÇÕES EXTERNAS NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL.....	14
QUADRO 4-3 – CARACTERÍSTICAS DE ARMAZENAMENTO DOS RESERVATÓRIOS DO SISTEMA PARAÍBA DO SUL ...	28
QUADRO 4-4 – CONDICIONANTES DE OPERAÇÃO DEFINIDAS NA RESOLUÇÃO Nº 211/2003.....	34
QUADRO 4-5 - RESOLUÇÕES DE REDUÇÃO TEMPORÁRIA ESTABELECIDAS DURANTE A CRISE HÍDRICA 2014/201635	
QUADRO 4-6 – CONDICIONANTES DEFINIDOS NA RESOLUÇÃO Nº 1382/2015	37
QUADRO 4-7 – RESUMO DAS RESTRIÇÕES DE VAZÕES MÍNIMAS ESTABELECIDAS AO LONGO DOS ANOS.....	39
QUADRO 5-1 – GERAÇÃO DE ENERGIA MÉDIA DIÁRIA, VAZÃO NATURAL AFLUENTE E SUAS VARIAÇÕES.....	43
QUADRO 5-2 – COMPARAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA MÉDIA DIÁRIA E VAZÃO MÉDIA AFLUENTE PRÉ-RESOLUÇÃO E NO PERÍODO RECENTE	44

LISTA DE SIGLAS

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas do Rio Paraíba do Sul

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

AUREN – Auren Energia

BHPS – Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul

CBA – Companhia Brasileira de Alumínio

CEDAE – Companhia Estadual de Águas e Esgotos (RJ)

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

EEAB – Estação Elevatória de Água Bruta

ETA – Estação de Tratamento de Água

GAOPS – Grupo de Assessoramento à Operação do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul

GTAOH – Grupo de Trabalho de Alocação de Água

HEC-ResSim – *Reservoir System Simulation* (modelo do USACE)

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

LABSID – Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (Poli-USP)

LIGHT – Light Energia

MHD-INPE – Modelo Hidrológico Distribuído do INPE

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PISF – Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional

Q_{mt} – Vazão média de longo termo

RCP 4.5 / RCP 8.5 – *Representative Concentration Pathways* (cenários climáticos)

RE – Reservatório Equivalente

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios

SEI – *Stockholm Environment Institute*

SPAGUAS – Agência de Águas do Estado de São Paulo

USACE – U.S. Army Corps of Engineers

UHE – Usina Hidrelétrica

UEL – Usina Elevatória

VU – Volume Útil

VUe – Volume Útil Equivalente

WEAP – *Water Evaluation And Planning System*

1. APRESENTAÇÃO

Este documento técnico consiste no sexto produto do estudo em desenvolvimento para a Associação Pró-Gestão das Águas do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP com vistas à atualização do quadro de demandas hídricas e atualização dos balanços hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

O estudo vem sendo elaborado no contexto do contrato nº 071/2023 assinado entre a AGEVAP e o Consórcio NIPPON KOEI LAC – REGEA – RHAMA. Nesse sentido, este produto apresenta os resultados do trabalho de Articulação e Consolidação de Dados Secundários. Para isso, o presente documento é estruturado em nove capítulos, incluindo este de apresentação, como exposto a seguir:

- ✓ Capítulo 1 – Apresentação: apresenta a estrutura do documento;
- ✓ Capítulo 2 – Objetivos: apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos a serem atingidos com o desenvolvimento do estudo;
- ✓ Capítulo 3 – Metodologia de processo: apresenta o caminho previsto para a execução do trabalho, envolvendo todas as etapas de estudo;
- ✓ Capítulo 4 – Caracterização do sistema hidráulico da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul: apresenta uma descrição geral do sistema, caracterização das transposições, histórico da operação incluindo as regras operativas vigentes e seu processo de evolução;
- ✓ Capítulo 5 – Avaliação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015: evolução dos volumes armazenados após a implementação da resolução e análise crítica para subsidiar a construção de possíveis propostas de aprimoramentos;
- ✓ Capítulo 6 – Estudos anteriores: apresenta os estudos anteriores já realizados sobre avaliação da operação do sistema hidráulico da bacia e uma análise crítica sobre os referidos estudos;
- ✓ Capítulo 7 – Diretrizes para estudos futuros: apresenta as diretrizes para estudos de alternativas operacionais para o sistema;
- ✓ Capítulo 8 – Considerações finais: apresenta as considerações finais para este produto;
- ✓ Capítulo 9 – Referências.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo trata da atualização do quadro de demandas e do balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Para isso, várias atividades vêm sendo desenvolvidas, como será apresentado mais adiante no capítulo de metodologia.

Este produto trata especificamente da caracterização do histórico e diagnóstico das regras operativas das UHEs do Sistema Hidráulico da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, realizado a partir do histórico de operação da bacia, incluindo análise de series históricas de vazões e volumes armazenados nos principais reservatórios da bacia, bem como a análise de legislações e regras operativas.

Podem ser destacados, na sequência, alguns objetivos específicos e que serão atendidos no contexto desse produto:

- Caracterização e apresentação do sistema hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul;
- Compilação do histórico de leis/decretos/portarias que estabeleceram as regras operativas da bacia do rio Paraíba do Sul ao longo do tempo;
- Caracterização histórica e sazonal das vazões afluentes, das vazões naturais, bem como caracterização do histórico de volumes armazenados, de maneira a realizar um diagnóstico do sistema;
- Avaliação de estudos anteriores sobre a operação do sistema hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul;
- Avaliação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015 trazendo uma análise crítica que possa subsidiar a construção de possíveis propostas de aprimoramentos para a Resolução;
- Elaboração de diretrizes para subsidiar estudos futuros sobre alteração de regras operativas da bacia.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO E METODOLOGIA

Este trabalho está previsto para ser desenvolvido em um total de oito etapas, tendo iniciado com o planejamento do estudo e seguindo até a consolidação do relatório final e do banco de dados com as informações geradas e sistematizadas ao longo do estudo.

Para entendimento das etapas de desenvolvimento do estudo, foi construída a Figura 3-1 com o processo adotado envolvendo o caminho previsto, destacando, em verde, as etapas já concluídas, envolvendo as etapas anteriores e a relacionada ao presente produto. A Etapa 6 refere-se à avaliação do histórico e elaboração de um diagnóstico das regras operativas das UHEs do Sistema Hidráulico da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, visando a elaboração de diretrizes para subsidiar estudos futuros sobre alteração de regras operativas da bacia.

A presente etapa trata da avaliação de impactos de alterações das regras operativas das UHEs na bacia. No entanto, no início do desenvolvimento dos estudos dessa etapa, foi verificada indisponibilidade de informações advindas do estudo de disponibilidade hídrica que permitissem tal análise e, além disso, falta de governabilidade para a proposição de tais alterações. Dessa forma, foram realizadas reuniões com a equipe técnica da AGEVAP de forma a verificar ajustes possíveis para o escopo do produto em relação à demanda, sendo definido que seria realizada uma análise histórica documental em relação a trabalhos já desenvolvidos e, na sequência, segue a apresentação de diretrizes para a continuidade dos estudos relacionados à temática. Nesse sentido, o presente produto segue essa linha, como acordado em função das questões relacionadas à presente temática.

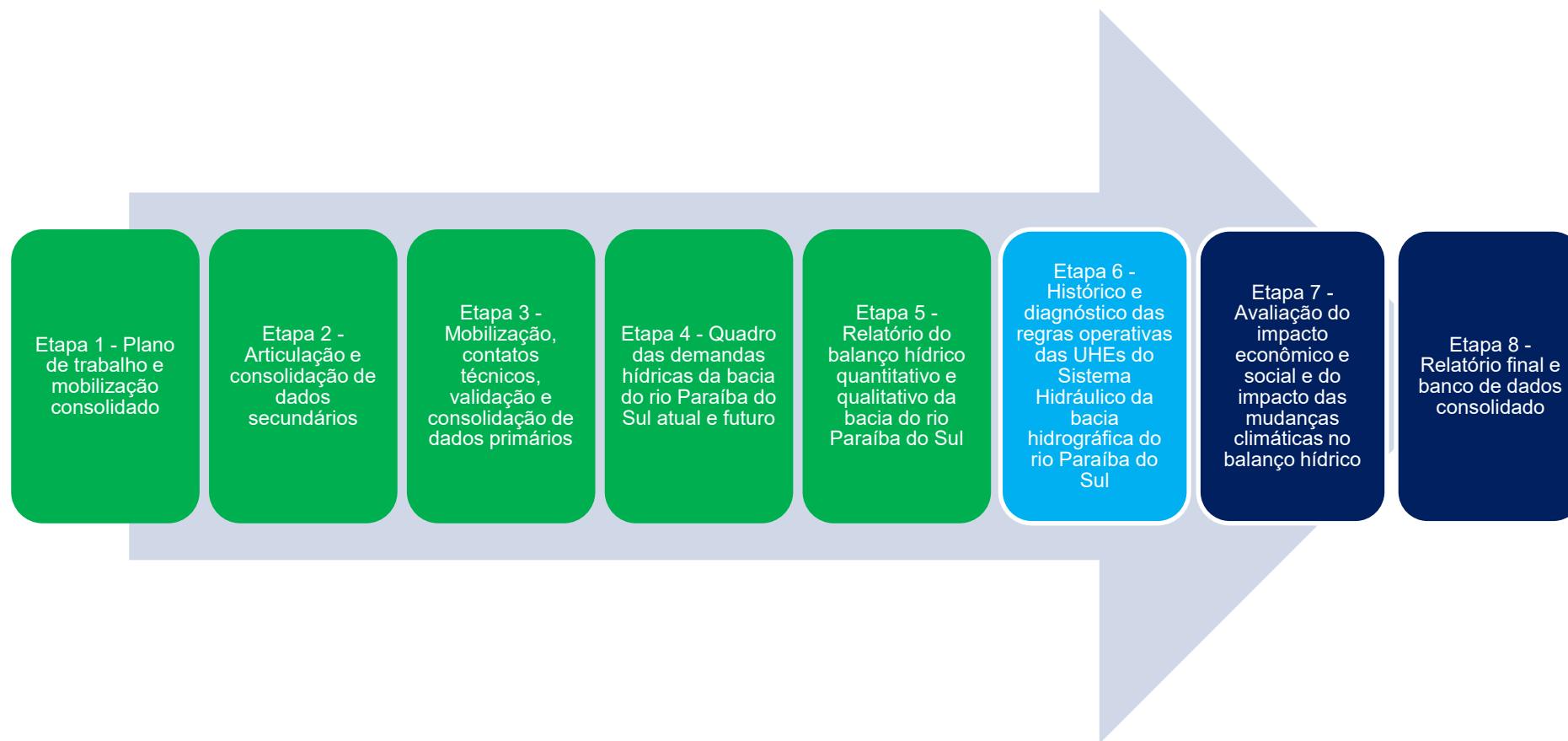


Figura 3-1 – Fluxograma de processo para o desenvolvimento do estudo.

Fonte: Elaborado pelo Consórcio.

4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA HÍDRÁULICO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

4.1. DESCRIÇÃO GERAL

O início das intervenções na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul ocorreu nos primeiros anos do Século 20, quando foi concluído o reservatório de Lajes, no Ribeirão das Lajes, em 1908, um dos formadores do rio Guandu (ANA, 2015). Em 1913, ocorreu a primeira transposição das águas da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul para a vertente Atlântica por meio do reservatório de Tocos, no rio Piraí, que deriva vazões para o reservatório de Lajes através de um túnel por gravidade. Na década de 1930 foi implantada uma adutora de 72 km, derivando as águas do ribeirão das Lajes até o Derby Club, atual Estádio do Maracanã, para abastecimento do então Distrito Federal, alcançando uma vazão superior a 5 m³/s, em 1949.

As principais barragens da bacia hidrográfica foram construídas entre as décadas de 1950 e 1970, com as funções principais de geração hidrelétrica e regularização de vazões. Em 1952, a Usina Elevatória (UEL) Santa Cecília entrou em operação, com capacidade de desviar no máximo 160 m³/s do rio Paraíba do Sul, o que seria equivalente a aproximadamente 60% da vazão natural média deste rio no local, que corresponde a 267 m³/s (de 1993 a 2024).

Como a barragem de Santa Cecília praticamente não possui capacidade de regularização de vazões, em 1959 entrou em operação o reservatório de Santa Branca, situado a montante, no trecho paulista do rio Paraíba do Sul. Em 1962, foi concluído o último de uma série de aproveitamentos hidrelétricos no complexo de Lajes, a UHE Pereira Passos. A partir de então, intensificaram os investimentos em reservatórios de regularização do trecho de montante da UEL Santa Cecília (ANA, 2015), entrando em operação Funil (1969), Jaguari (1972), e Paraibuna/Paraitinga (1978).

Atualmente, o sistema de reservatórios e Usinas Hidroelétricas (UHEs) da bacia do rio Paraíba do Sul possui 17 aproveitamentos em operação, cujas informações estão apresentadas no Quadro 4-1, junto aos principais dados operativos. Embora alguns estejam localizados fora dos limites da bacia, devido à transposição e ao manejo integrado dos recursos hídricos, todos os reservatórios são considerados como integrantes do sistema do Paraíba do Sul.

A Figura 4-1 apresenta a localização dos principais aproveitamentos e as transposições de vazões realizadas na bacia do rio Paraíba do Sul. Vale ressaltar que os caminhos das transposições indicadas no mapa representam apenas uma ilustração visual dos locais onde há troca de água na bacia.

Quadro 4-1 – Principais aproveitamentos localizados na bacia do rio Paraíba do Sul e dados operativos

Aproveitamento	Corpo Hídrico	Área de Drenagem (km²)	Latitude	Longitude	Agente	Início do Enchimento	Início da Operação	Potência Efetiva Total (MW)	Nível Mínimo Normal (m)	Nível Máximo Normal (m)	Nível Máximo <i>Maximorum</i> (m)	Engolimento Mínimo (m³/s)	Engolimento Máximo (m³/s)
UHE Paraibuna	Rio Paraibuna	4.086	23°24'35,541"S	45°36'2,234"W	AUREN	08/01/1974	20/04/1978	86	649,60	714,0	716,50	31,5	140,8
UHE Santa Branca	Rio Paraíba do Sul	4.912	23°22'26,97"S	45°52'17,79"W	LIGHT	09/12/1959	06/06/1999	56	605,0	622,0	623,4	35,5	156,2
UHE Jaguari	Rio Jaguari	1.310	23°11'42,73"S	46°01'42,68"W	FURNAS	05/12/1969	02/01/1972	27,6	603,2	623,0	625,8	16,0	70,4
UHE Funil	Rio Paraíba do Sul	13.499	22°31'43,72"S	44°34'04,55"W	FURNAS	30/10/1969	22/12/1969	222	444,0	466,50	466,87	61,50	405,90
UEL Santa Cecília	Rio Paraíba do Sul	16.630	22°28'52,98"S	43°50'19,40"W	LIGHT	03/1952	16/03/1952	-32	353,0	353,95	353,00	NA	NA
RES Lajes	Rio Ribeirão das Lajes	304	22°41'26,84"S	43°51'49,11"W	LIGHT	01/1905	NA	NA	386,5	415,0	416,5	NA	NA
UHE Fontes	Rio Ribeirão das Lajes	-	22°41'30,62"S	43°51'49,81"W	LIGHT	NA	01/01/1940	132	8,5	56,1	415,0	415,0	415,0
UHE Pereira Passos	Rio Ribeirão das Lajes	317	22°41'11,21"S	43°49'27,06"W	LIGHT	09/1962	23/10/1962	100	82,5	86,5	86,5	341,0	77,5
UHE Nilo Peçanha	Rio Guandu	-	22°40'59,871"S	43°52'23,705"W	LIGHT	NA	01/04/1953	380	399,0	399,0	399,0	9	154
RES Vigário	Rio Piraí	-	22°37'46,60"S	43°53'44,64"W	LIGHT	NA	NA	-88	396,0	399,0	399,2	NA	NA
RES Tocos	Rio Piraí	382	22°44'57,20"S	44°07'31,46"W	LIGHT	03/1913	NA	NA	440,0	448,0	452,0	NA	NA
RES Santana	Rio Piraí	882	22°31'55,38"S	43°49'08,23"W	LIGHT	03/1952	NA	NA	361,5	363,60	363,60	NA	NA
UHE Picada	Rio do Peixe	1.721	21°53'04,73"S	43°32'26,69"W	AUREN	27/05/2005	01/07/2006	50	658,7	659,2	660,3	11,0	48,40
UHE Sobragi	Rio Paraibuna	3.721	21°58'43,98"S	43°21'48,22"W	CBA	30/08/1998	15/09/1998	60	436,40	437,30	439,78	14,50	95,70
RES Anta	Rio Paraíba do Sul	30.593	22°02'02,81"S	43°00'03,53"W	FURNAS	23/02/2013	NA	NA	250,5	251,5	251,5	35,5	156,2
UHE Simplicio	Rio Paraíba do Sul	30.593	21°55'14,12"S	42°47'36,56"W	FURNAS	01/05/2013	05/06/2013	305,7	246,0	251,5	251,5	51,5	339,9
UHE Ilha dos Pombos	Rio Paraíba do Sul	32.233	21°50'36,68"S	42°34'46,22"W	LIGHT	03/1924	06/07/1924	187,1	137,4	140,0	140,0	48,5	728,2

Notas: UHE – Usina Hidroelétrica

UEL – Usina elevatória

RES - Reservatório

Fonte: elaborado pelo Consórcio a partir de dados do ONS.

Consórcio NIPPON KOEI LAC – REGEA – RHAMA
Rua Claudio Soares, 72, Conjuntos 301 a 303, Pinheiros, São Paulo – SP

4.2. TRANSPOSIÇÕES

No contexto de vazão transferida, considera-se a vazão recebida ou cedida entre reservatórios por meio de canais, túneis, estações de bombeamento ou outras estruturas. Em casos de transposição de vazões, usualmente estão envolvidas duas usinas/reservatórios: a cedente e a receptora. Em algumas situações, ambas podem desempenhar os dois papéis.

Existem duas transposições de água na bacia do rio Paraíba do sul (Figura 4-2). Uma que transpõe água da bacia do rio Paraíba do Sul para o rio Guandu, na porção média do rio Paraíba do Sul, construída na década de 1950. Outra que transpõe água, interligando o reservatório de Jaguari com o reservatório do rio Atibainha, que pertence ao Sistema Cantareira, na bacia do rio Piracicaba-SP, em operação desde 2018. Ambas são importantes para o abastecimento dos centros urbanos e das capitais dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. No sistema Guandu, destaca-se também o abastecimento do polo industrial. Além disso, existe também a transposição do rio Macabu, que não será aprofundada neste estudo.

Existe também um sistema de transferência de vazões dentro dos limites da bacia do rio Paraíba do Sul. O Reservatório Anta transfere vazão para a UHE Simplício, sendo as únicas vazões afluentes da UHE, desta forma, a vazão transferida é mantida dentro da bacia do Paraíba do Sul, então não será foco da avaliação deste relatório.

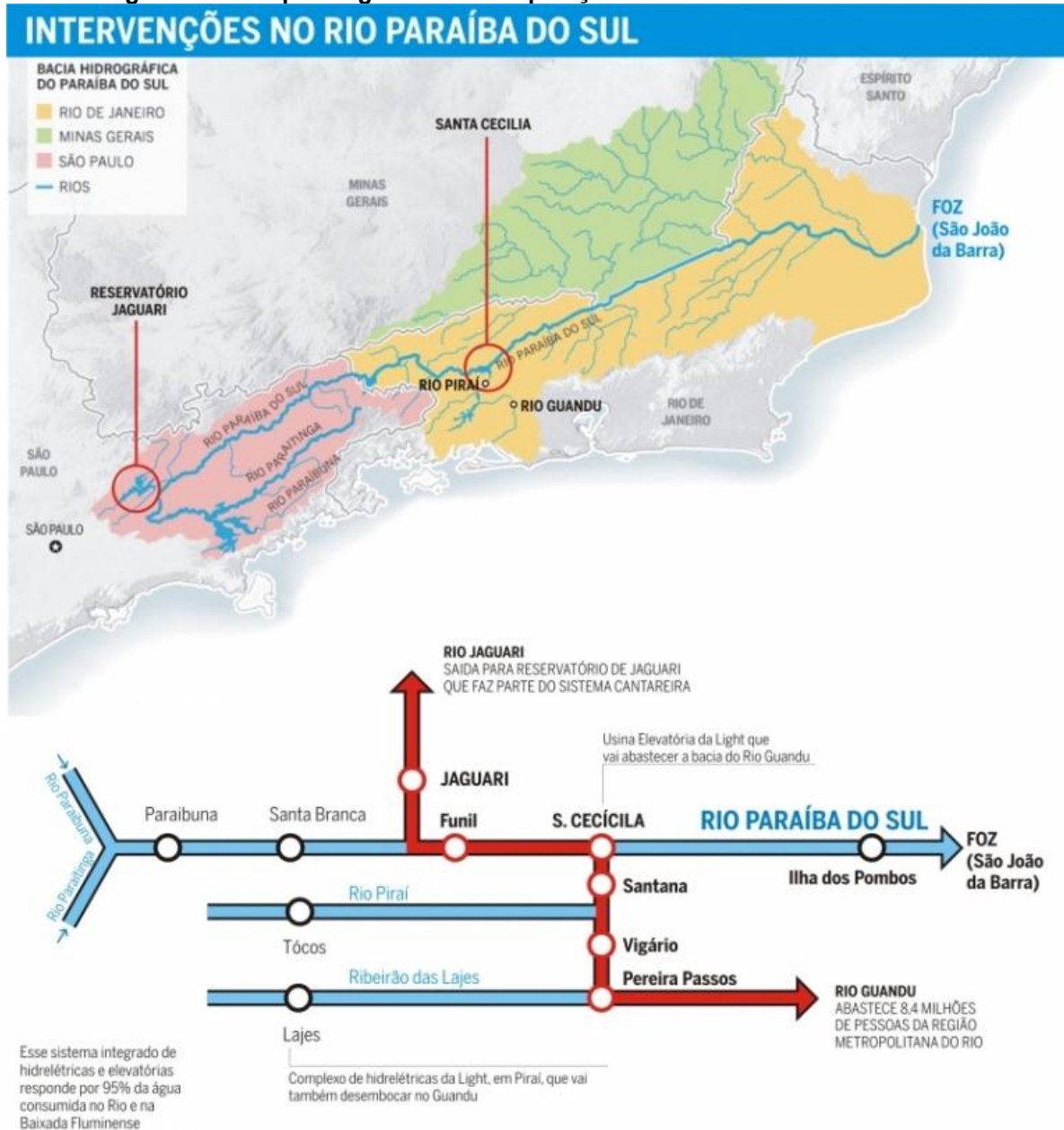
O Quadro 4-2 apresenta um resumo das transposições que retiram água da bacia do rio Paraíba do Sul, enquanto a Figura 4-3 apresenta um esquema geral do percurso dos principais rios da bacia do Paraíba do Sul, incluindo os aproveitamentos e as transposições realizadas. Nos subitens a seguir são apresentados mais detalhes do contexto de cada uma das transposições.

Quadro 4-2 – Transposições externas na bacia do Paraíba do Sul

Transposição	Sistema	Bacia de Origem	Bacia de Destino	Vazão média (m³/s)
Jaguari - Atibainha	Paraíba do Sul - PCJ	Paraíba do Sul	Rio Piracicaba	5,1
UEL Santa Cecília - RES Santana	Complexo de Lajes	Paraíba do Sul	Rio Guandu	119,0

Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 4-2 – Esquema geral das transposições da bacia do rio Paraíba do Sul



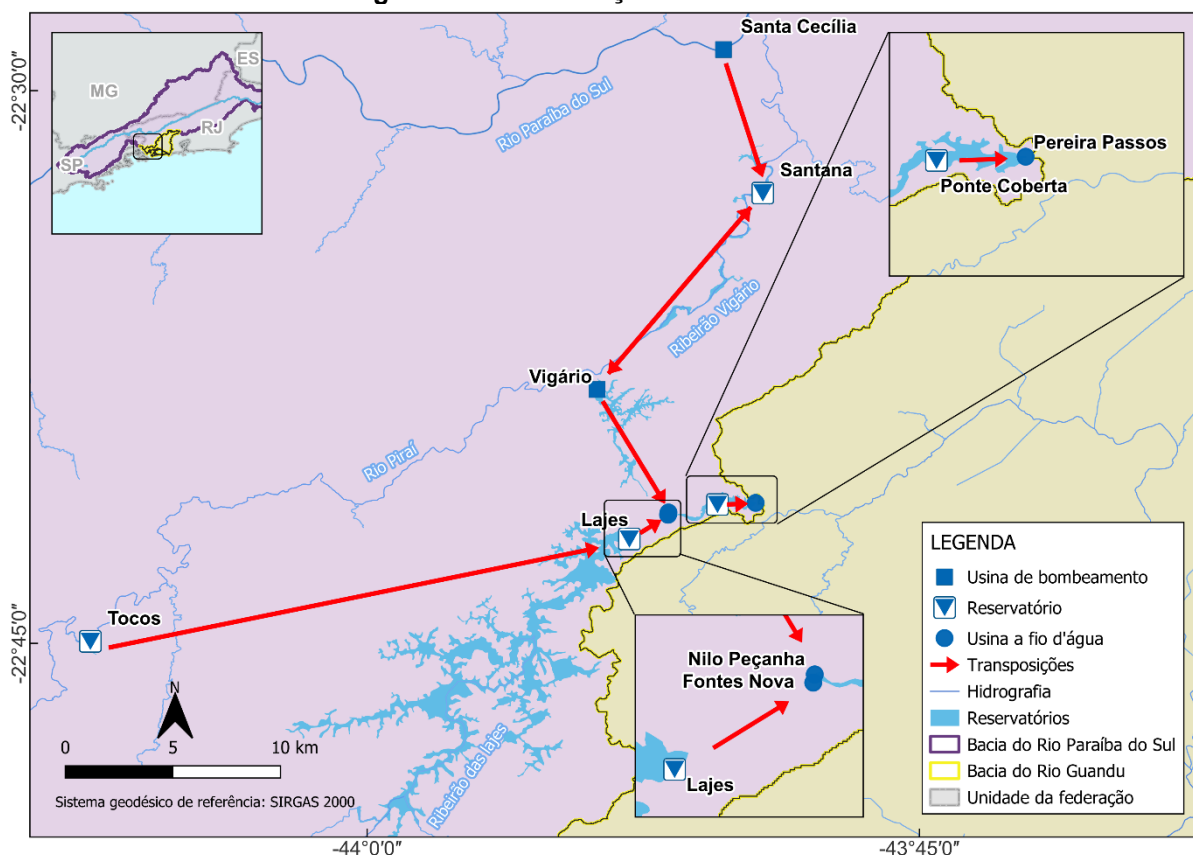
Fonte: CAMPOS MAGAZINE NEWS (2019)

Consórcio NIPPON KOEI LAC – REGEA – RHAMA
Rua Claudio Soares, 72, Conjuntos 301 a 303, Pinheiros, São Paulo – SP

4.2.1. Transposição Sistema Guandu

O sistema Guandu é composto por um conjunto de rios, canais, reservatórios, usinas hidrelétricas, estações elevatórias e demais estruturas hidráulicas (Figura 4-4). Ele é responsável por abastecer aproximadamente 9 milhões de pessoas, o que corresponde a cerca de 80% do abastecimento de água potável da região metropolitana do Rio de Janeiro (CEDAE).

Figura 4-4 – Localização do sistema Guandu



Fonte: elaborado pelo Consórcio

O sistema inicia-se na usina elevatória (UEL) de Santa Cecília, que bombeia água do rio Paraíba do Sul para o reservatório de Santana (desnível de 15 m), no rio Piraí, invertendo o curso deste rio e elevando significativamente sua vazão. A UEL Santa Cecília tem uma capacidade média de bombeamento de 119 m³/s. Após receber a vazão transferida, no reservatório Santana são bombeadas vazões para o reservatório Vigário (desnível de 35 m), onde, por sua vez, são transferidas vazões (por gravidade) para as UHEs Fontes Nova e Nilo Peçanha. O reservatório de Tocos transfere vazões para o reservatório de Lajes, localizado no ribeirão Lajes, por gravidade, através de um túnel com capacidade máxima de 25 m³/s (AGEVAP, 2014). Essa transposição contribui para aumentar a capacidade de geração da

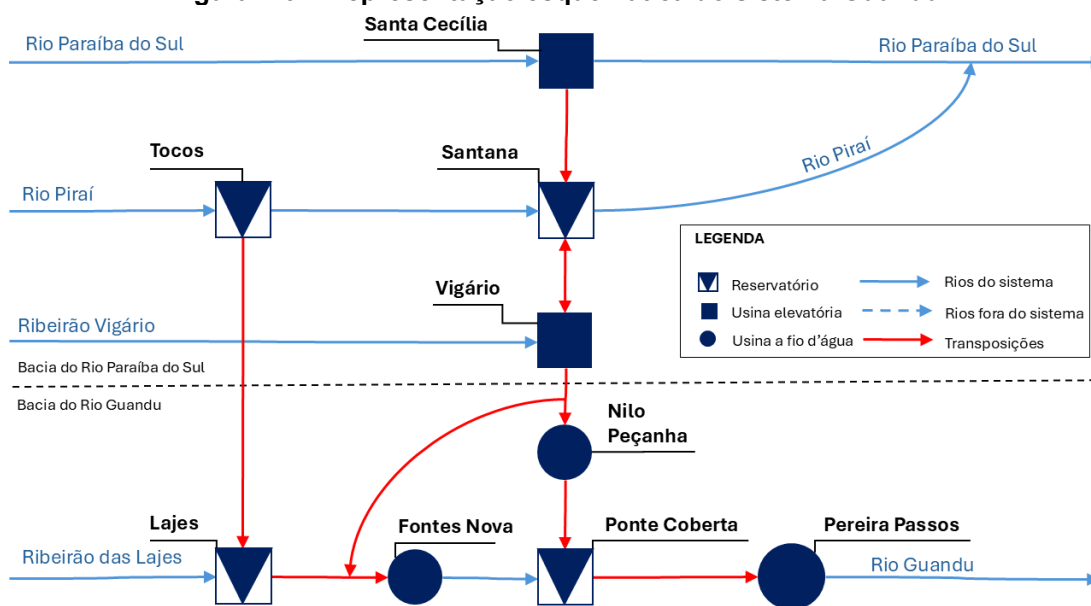
UHE Fontes Nova. Posteriormente as águas fluem para o reservatório de Ponte Coberta da Usina Hidrelétrica de Pereira Passos, desaguando no rio Guandu. A funcionalidade dos aproveitamentos do complexo das Lajes está esquematizada na Figura 4-5 e Figura 4-6.

Figura 4-5 – Esquema Geral dos Aproveitamentos Hidrelétricos dos rios Paraíba do Sul, Pirai e Ribeirão das Lajes



Fonte: LIGHT, 2023.

Figura 4-6 – Representação esquemática do sistema Guandu



Fonte: elaborado pelo Consórcio

O rio Guandu, que em condições naturais teria uma vazão média de cerca de 25 m³/s, recebe uma contribuição média de 146 m³/s do desvio Paraíba do Sul - Piraí e de 10 m³/s do desvio Tocos-Lajes (valores observados decorrentes da operação até 2015, data do Plano de Ações Complementares para a Gestão da Crise Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul, realizado pela ANA em 2015). A Estação de Tratamento de Águas - ETA Guandu entrou em operação em 1955 e hoje trata cerca de 43 m³/s de água (CEDAE, s.d.), sendo uma das maiores estações de tratamento de água do mundo.

Segundo ANA (2015) a interligação das bacias dos rios Paraíba do Sul e Guandu une as bacias de forma praticamente irreversível e, por isso, não se recomenda a análise de seus recursos hídricos de forma isolada. Como mencionado, o sistema se localiza numa das áreas de maior concentração populacional e industrial do país o que, numa bacia com disponibilidade hídrica limitada pela sua pequena área de drenagem, gera problemas de conflitos devido ao alto comprometimento dos recursos hídricos. Ainda de acordo com ANA (2015), o ponto mais crítico do sistema em termos de escassez e de conflitos pelo uso dos recursos hídricos é justamente na EE Santa Cecília, onde é feita a divisão entre as águas que serão bombeadas e as que seguirão para jusante da bacia. Portanto, nota-se que tal região necessita de atenção especial no que tange à definição de sua operação, tendo em vista ser um ponto crítico para a gestão das águas na bacia.

O Complexo de Lajes é gerido pela Light Energia a partir de regras definidas pelo Governo Federal. No Item 4.4.2 será apresentado um histórico dos decretos de operação do sistema.

4.2.2. Transposição Jaguari – Atibainha

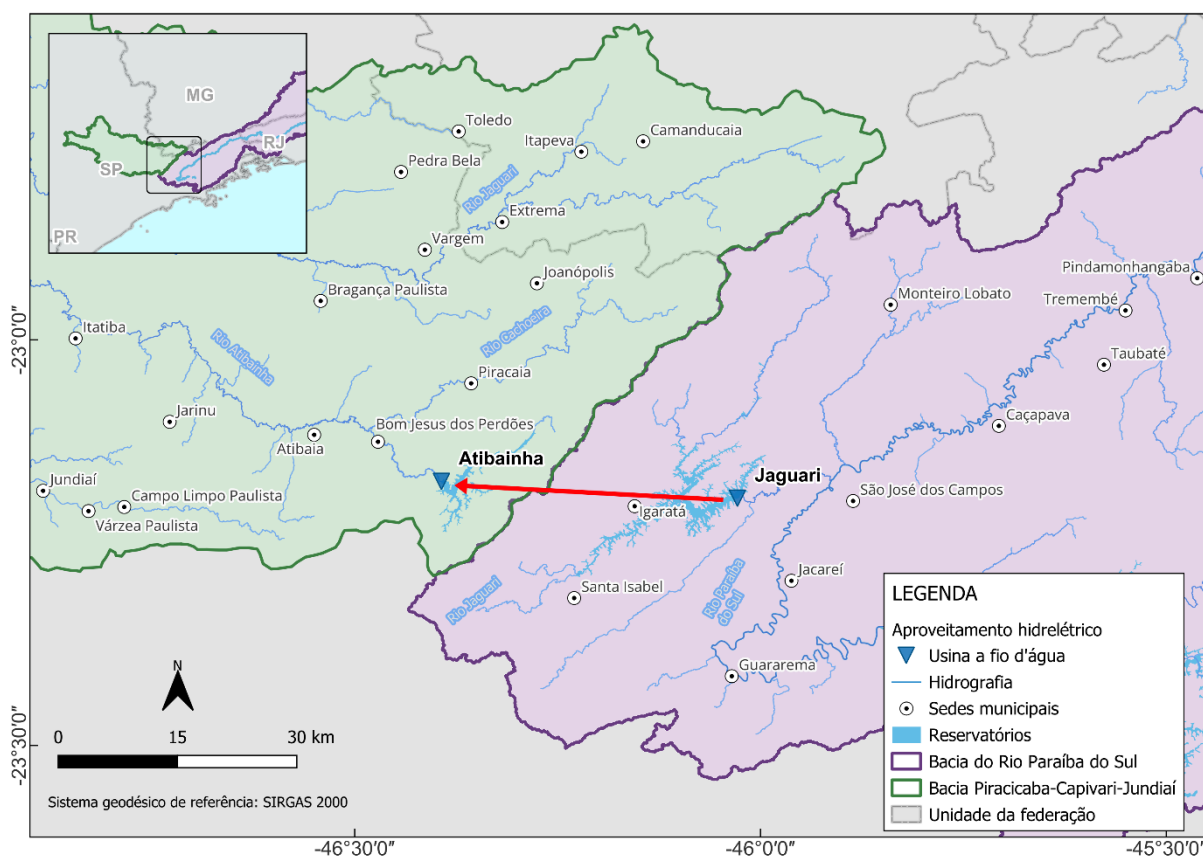
Como parte das medidas contingentes para a crise hídrica em 2014-2015 (que será caracterizada no Item 4.3), em fevereiro de 2018 entrou em operação a transposição de água da bacia do Paraíba do Sul para o reservatório Atibainha no Sistema Cantareira. Essa transposição beneficia diretamente 9,5 milhões de pessoas (dado da época em que iniciou sua operação) na região metropolitana de São Paulo (SABESP, 2018). O reservatório Jaguari também é utilizado para a geração de energia hidrelétrica (UHE Jaguari). A Portaria DAEE nº 4563/17 de 11/12/17 (Agência de Águas do Estado de São Paulo – SPAGUAS, s.d.), concede a outorga no prazo de 10 anos para esta transposição.

A Figura 4-7 ilustra a localização do reservatório Jaguari na Bacia do Paraíba do Sul e os reservatórios do Sistema Cantareira. A obra é composta pela Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB) construída junto ao reservatório Jaguari (CESP), cerca de 13 km de adutora e

6 km de túnel escavado em rocha. Na Figura 4-8 é apresentada a interligação do sistema Jaguari-Atibainha.

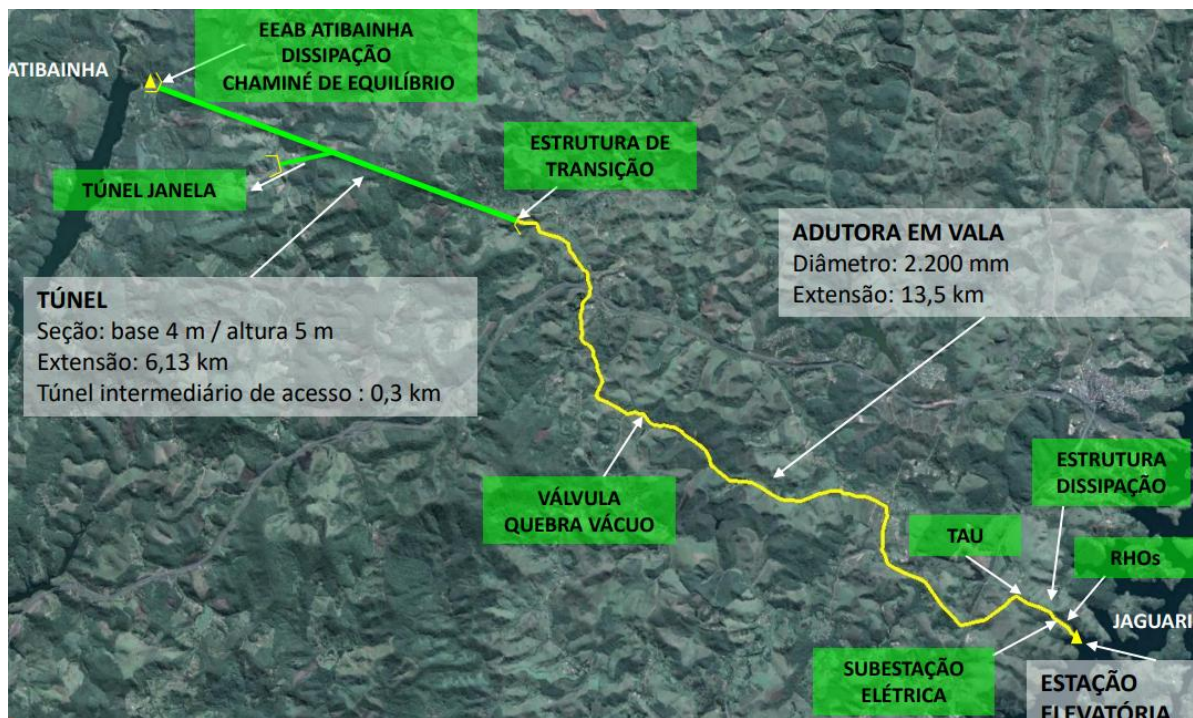
As condicionantes operativas dessa transposição constam na Resolução ANA nº 1.931/2017 (ANA, 2017). No Sistema Cantareira, o seu uso é limitado a um volume anual total de até 162 hm³ para o reservatório Atibainha, o que equivale à captação de uma vazão média anual de 5,13 m³/s (máxima de 8,5 m³/s). Destaca-se, no entanto, que se o Sistema Cantareira estiver operando na faixa especial, ou seja, com volume útil inferior à 20%, as vazões bombeadas são definidas pelos órgãos gestores para aumentar a segurança hídrica, conforme § 3º do Art. 4º da Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 925, de 29 de maio de 2017 (ANA, 2017). A interligação também possibilita o fluxo no sentido inverso, da represa Atibainha para a represa Jaguari, de até 12,2 m³/s, em situações específicas de cheia.

Figura 4-7 – Localização do sistema Jaguari - Atibainha



Fonte: elaborado pelo Consórcio

Figura 4-8 – Interligação do sistema Jaguari-Atibainha



Fonte: SABESP, 2018

4.3. CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA E SAZONAL DAS VAZÕES

4.3.1. Comportamento geral da série histórica

A caracterização do comportamento da série histórica de vazões é fundamental para compreender a dinâmica hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul e subsidiar a gestão integrada de seus reservatórios. Este item apresenta a análise da série histórica de vazões dos principais aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Paraíba do Sul, abrangendo o período de 1993 a 2024. As séries operativas foram obtidas do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR. (ANA, s.d.)

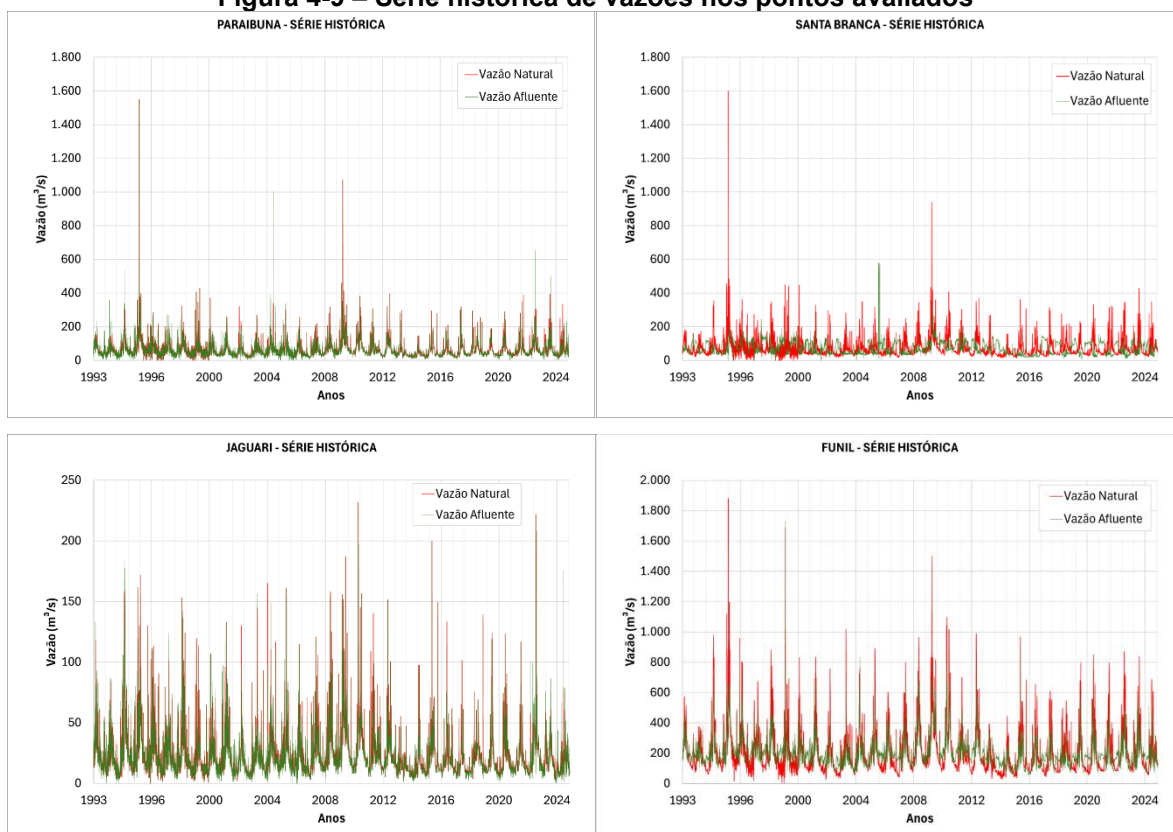
Foram consideradas para a análise apenas as usinas da cascata do rio Paraíba do Sul contemplando os reservatórios de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari, Funil e o reservatório de Ilha dos Pombos, sendo este último a fio d'água. A UHE Simplício, embora também pertença à cascata, foi desconsiderada na comparação porque iniciou operação em 2013, não dispondo de série histórica suficientemente longa para algumas análises. A usina elevatória de Santa Cecília também foi considerada visto que é um ponto de controle hidráulico importante da bacia.

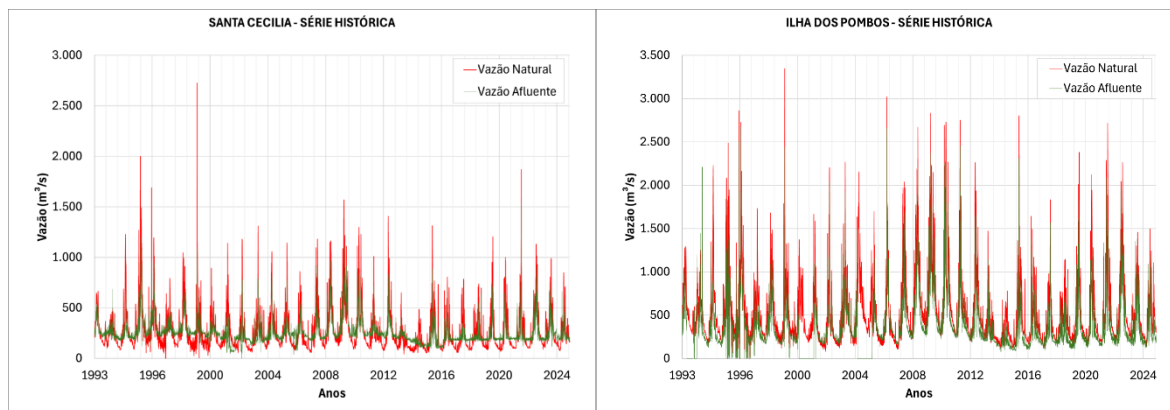
Para cada empreendimento são apresentados dois conjuntos de gráficos: inicialmente, a série histórica de vazões naturais e afluentes (Figura 4-9), seguida pelos gráficos de variabilidade

interanual das vazões (Figura 4-10). A variabilidade interanual apresenta a adimensionalização de vazões com base nos valores médios anuais e nas médias históricas para cada um dos locais de interesse, permitindo demonstrar, assim, a sequência de anos úmidos (acima de 1) e secos (abaixo de 1).

De forma geral, os gráficos de série histórica (Figura 4-9) evidenciam um regime sazonal bem definido. A vazão natural, representada em vermelho, apresenta picos mais pronunciados e maior variabilidade, refletindo a resposta direta às condições hidrológicas e aos eventos de precipitação na bacia. A vazão afluente, em verde, acompanha o mesmo padrão, porém com atenuação dos extremos, efeito da regularização promovida pelos reservatórios a montante e da operação coordenada do sistema. Entre os eventos hidrológicos mais relevantes, destacam-se as cheias de 1996, 2008 e 2020, registradas em praticamente todos os empreendimentos, e o período de seca severa de 2014 a 2016, quando as vazões permaneceram significativamente abaixo da média histórica.

Figura 4-9 – Série histórica de vazões nos pontos avaliados

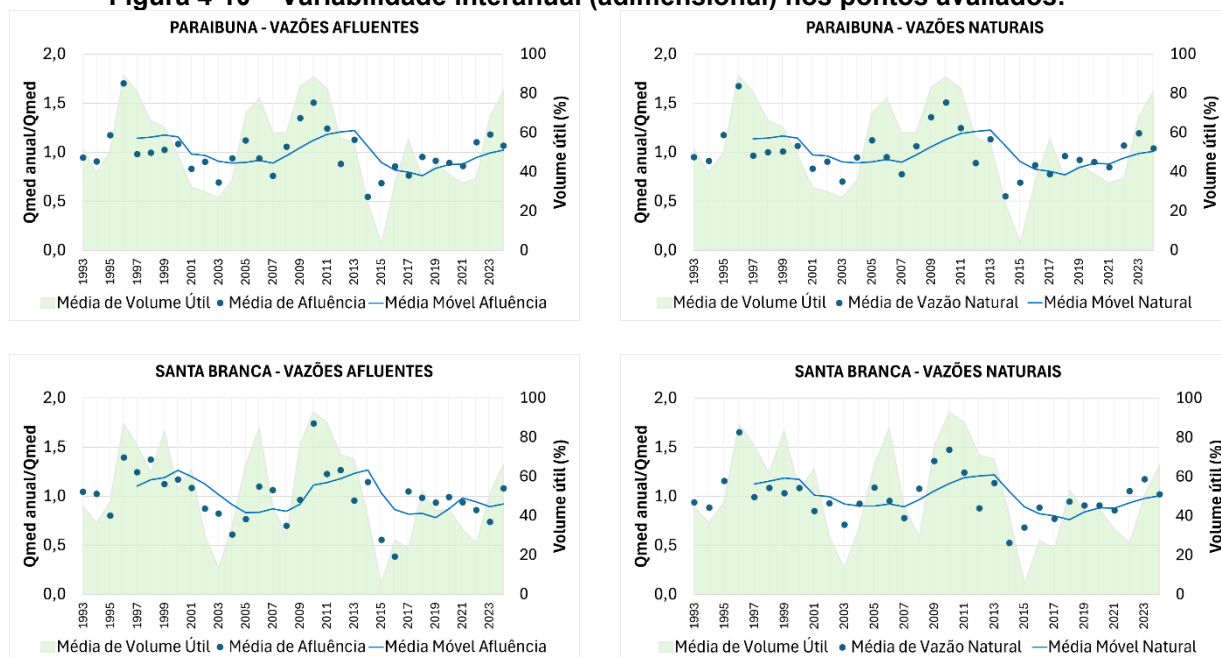


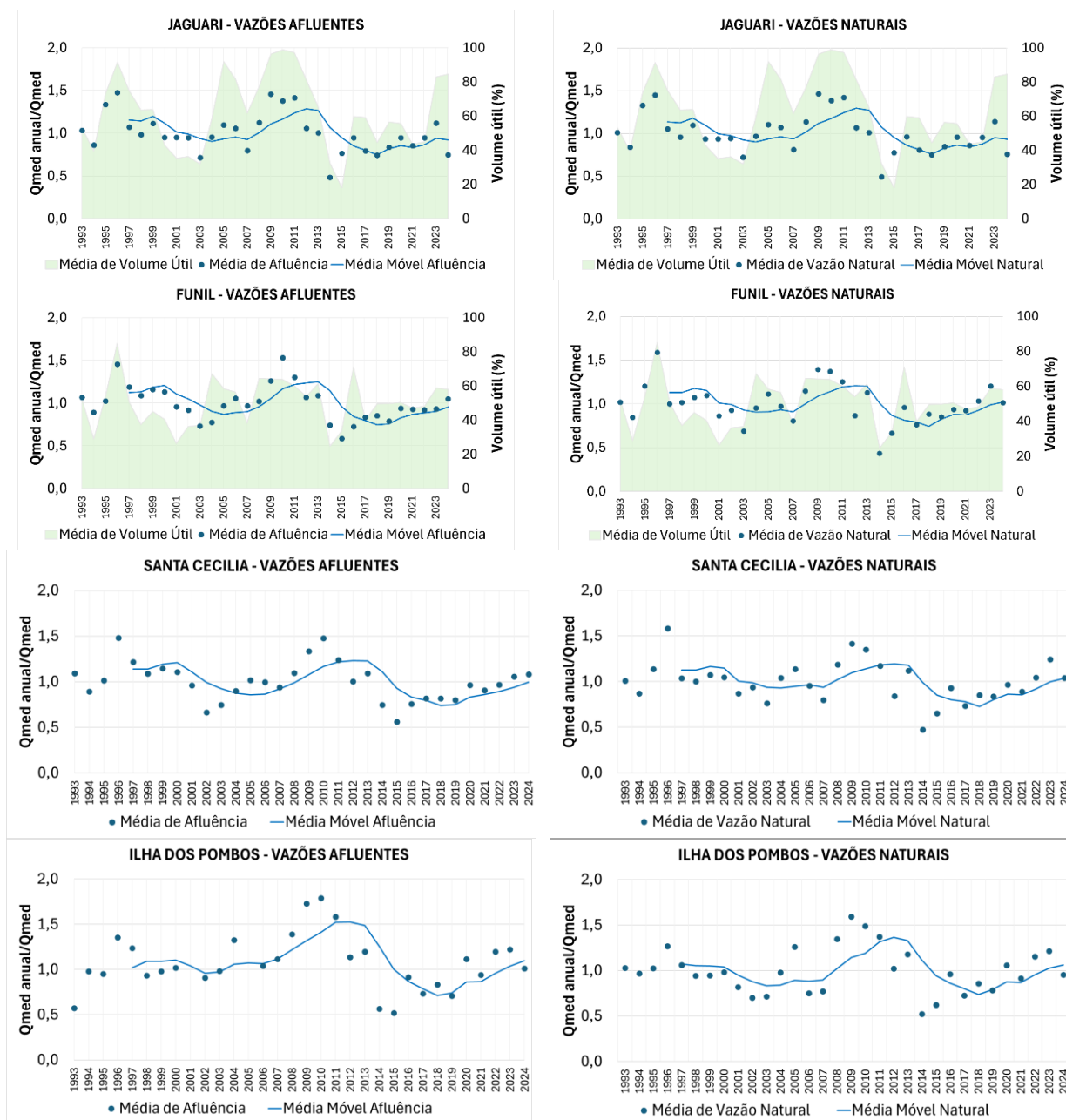


Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Nos gráficos de sazonalidade interanual (Figura 4-10) os dados foram tratados por meio de uma média móvel de cinco anos, o que permite evidenciar tendências de longo prazo, sendo possível identificar anomalias interdecadais do comportamento climático na região. Entre 2001 e 2007, a média móvel das vazões adimensionais manteve-se consistentemente abaixo da série histórica de vazões naturais em todos os reservatórios analisados. Em seguida, entre 2008 e 2013, observou-se uma tendência de anos acima da média histórica, sucedida por um novo período de valores abaixo da média entre 2014 e 2022. No intervalo mais recente, os gráficos indicam uma reversão, com a média móvel novamente acima da média histórica, sinalizando possivelmente a entrada em um ciclo de maior disponibilidade hídrica.

Figura 4-10 – Variabilidade interanual (adimensional) nos pontos avaliados.





Fonte: elaborado pelo Consórcio.

4.3.2. Sazonalidade do regime de vazão

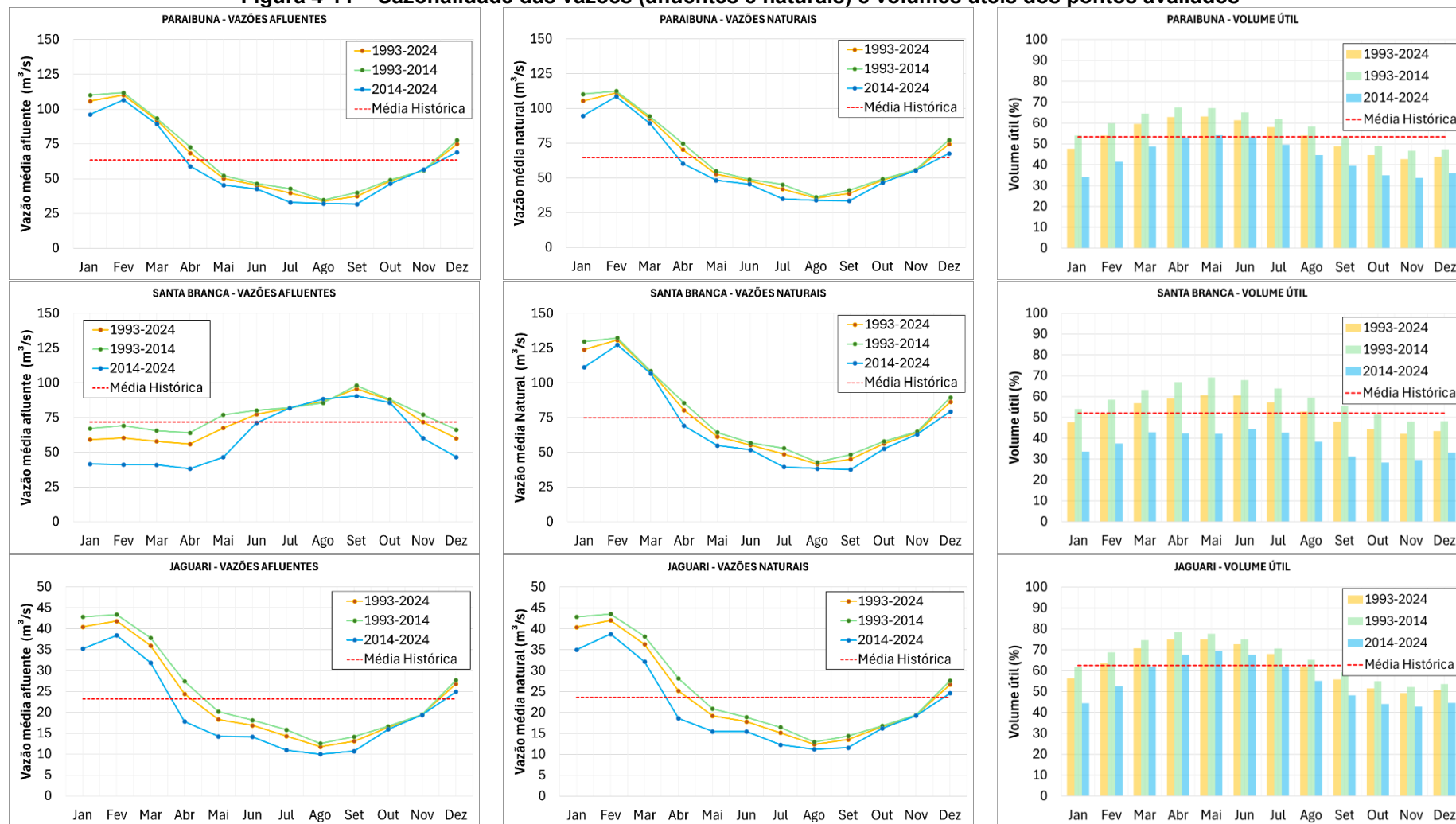
A avaliação da sazonalidade do regime de vazão é essencial para compreender como a disponibilidade hídrica se distribui ao longo do ano e como eventos climáticos e hidrológicos afetam os diferentes períodos sazonais. Essa análise permite identificar os meses de maior e menor aporte hídrico, além de evidenciar alterações no comportamento das vazões em diferentes períodos históricos.

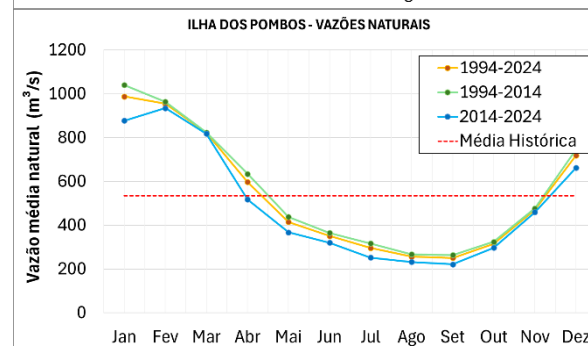
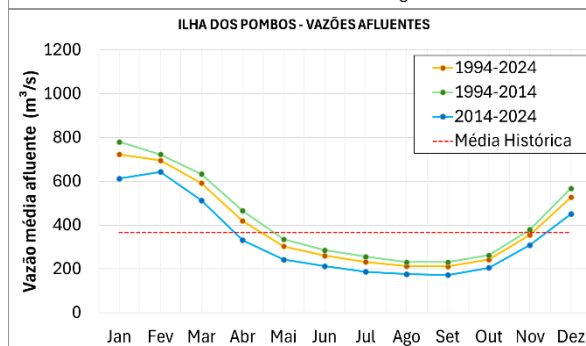
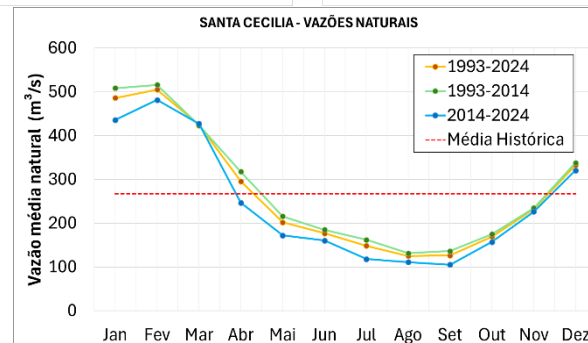
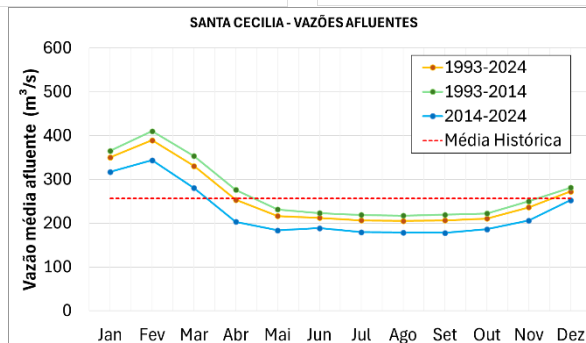
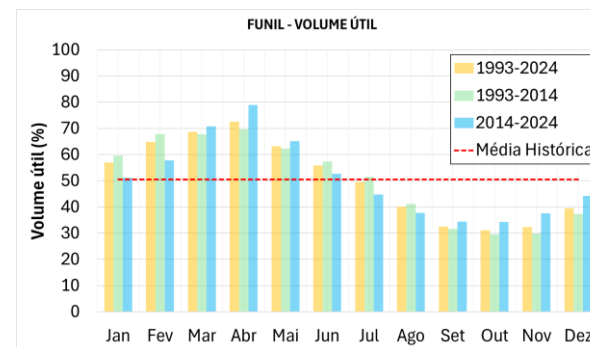
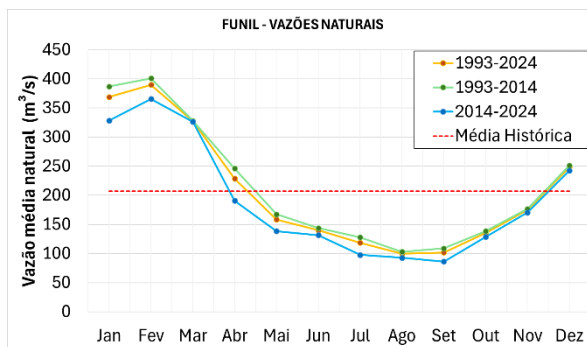
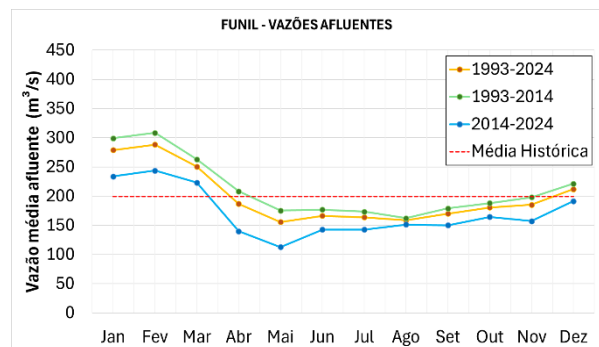
Os gráficos são apresentados na Figura 4-11 para cada reservatório e comparam a vazão média mensal afluyente e natural considerando três intervalos: a série completa (1993–2024 ou 1994–2024, conforme o caso), o período 1993–2014 (ou 1994–2014) e o período recente de 2014–2024. A linha tracejada indica a média histórica de referência (Vazão média de longo termo – Q_{mlt}), permitindo avaliar desvios sazonais em relação ao padrão de longo prazo.

De forma geral, observa-se um padrão sazonal bem definido para todos os aproveitamentos, com maiores vazões concentradas no período úmido, entre os meses de novembro e março, e menores valores no período seco, de maio a setembro. Os dados indicam que, no período recente (2014–2024), houve redução mais acentuada das vazões nos meses de estiagem em quase todos os reservatórios, além de um ligeiro recuo dos picos no início da estação chuvosa em alguns casos. Essa diminuição está associada ao período prolongado de estiagem registrado entre 2014 e 2017, cujos efeitos ainda se refletem nas médias mais baixas em relação ao histórico. Este comportamento é refletido também nos volumes armazenados nos reservatórios, com menores valores no período recente de 2014–2024. A única exceção é o reservatório do Funil, que possui aumento dos volumes úteis armazenados em 7 dos 12 meses do ano, em relação aos demais períodos avaliados.

A análise comparativa entre as vazões naturais e afluentes revela que estas últimas, já influenciadas pela operação das usinas hidrelétricas, apresentam uma tendência de amortecimento das vazões durante o período chuvoso e regularização durante o período seco. Esse efeito contribui para que, tanto em anos mais úmidos quanto em anos mais secos, as vazões afluentes se aproximem da média histórica, desempenhando um papel de regularização do regime hidrológico. Essa tendência é evidente nos reservatórios de Funil, Santa Cecília e Ilha dos Pombos, enquanto em Paraibuna e Jaguari as vazões naturais e afluentes apresentam comportamento bastante semelhante visto que são os primeiros reservatórios da cascata. Destaca-se ainda o caso de Santa Branca, cujo padrão difere dos demais: nesse sistema, as vazões afluentes apresentam picos justamente nos meses menos chuvosos, em contraste com a variabilidade natural, resultado das regras de operação do reservatório que condicionam a liberação de água em momentos distintos do regime hidrológico natural.

Figura 4-11 – Sazonalidade das vazões (afluentes e naturais) e volumes úteis dos pontos avaliados





Fonte: elaborado pelo Consórcio.

4.4. HISTÓRICO DA OPERAÇÃO E CRISE HÍDRICA 2014-2015

4.4.1. Evolução dos volumes armazenados

O conjunto dos quatro reservatórios existentes nesta bacia formam o denominado reservatório equivalente (RE), que tem capacidade total de reservação de 7.294,70 milhões de metros cúbicos, dos quais 4.341,90 milhões de metros cúbicos estão dentro da faixa normal de operação do setor elétrico (volume útil total). O reservatório de Paraibuna é o que possui maior capacidade de armazenamento (61% do volume útil total), seguido por Jaguari (18%), Funil (14%) e Santa Branca (7%). O Quadro 4-3 apresenta o detalhamento das informações sobre volume máximo e mínimo operacional e volume útil de cada reservatório.

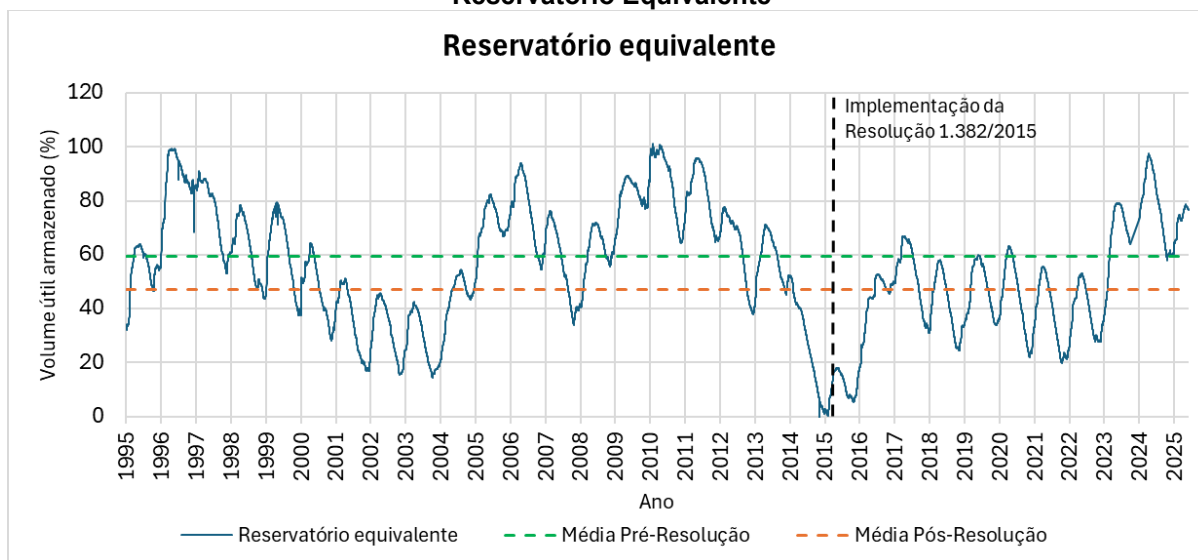
Quadro 4-3 – Características de armazenamento dos reservatórios do Sistema Paraíba do Sul

Reservatórios	Volume Máximo (hm³)	Volume Mínimo (hm³)	Volume útil		Volume Morto utilizável sem bombeamento	
			hm³	% do volume equivalente	hm³	% do volume equivalente
Paraibuna	4.731,7	2.095,6	2.636,1	60,7	425	9,8
Santa Branca	439	131	308	7,1	84	1,9
Jaguari	1.235,6	443,1	792,5	18,3	-	-
Funil	888,3	283	605,3	13,9	60	1,4
Reservatório Equivalente	7.294,6	2.952,7	4.341,9	100	569	13,1

Fonte: elaborado pelo consórcio a partir de ONS.

As séries históricas de volume armazenado nos reservatórios mencionados foram obtidas do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR, permitindo verificar o histórico da operação durante o período de 1993 a junho de 2025. A abordagem por meio do reservatório equivalente, como mostrado na Figura 4-12, permite visualizar, de forma conjunta, o regime de armazenamento dos quatro reservatórios analisados, proporcionando uma compreensão mais clara e integrada do comportamento do sistema ao longo do tempo. Durante as severas crises hídricas de 2001-2003 e 2014-2016, observou-se uma redução acentuada no volume útil de todos os reservatórios da região, sendo necessário, desta forma, implementar regras operativas mais restritivas. Nesses períodos, os volumes úteis reduziram-se a níveis historicamente críticos, alcançando 14 % em outubro de 2003 e chegando a 0% em novembro de 2014, valores não registrados em nenhum outro momento da série histórica. Observa-se que, em média, o período posterior à Resolução nº 1.382/2015 apresentou médias de volumes armazenados menores do que o período anterior. Porém, tal diminuição não pode ser atribuída exclusivamente à Resolução, tendo em vista que foi um período com menor disponibilidade hídrica (item 4.3.1).

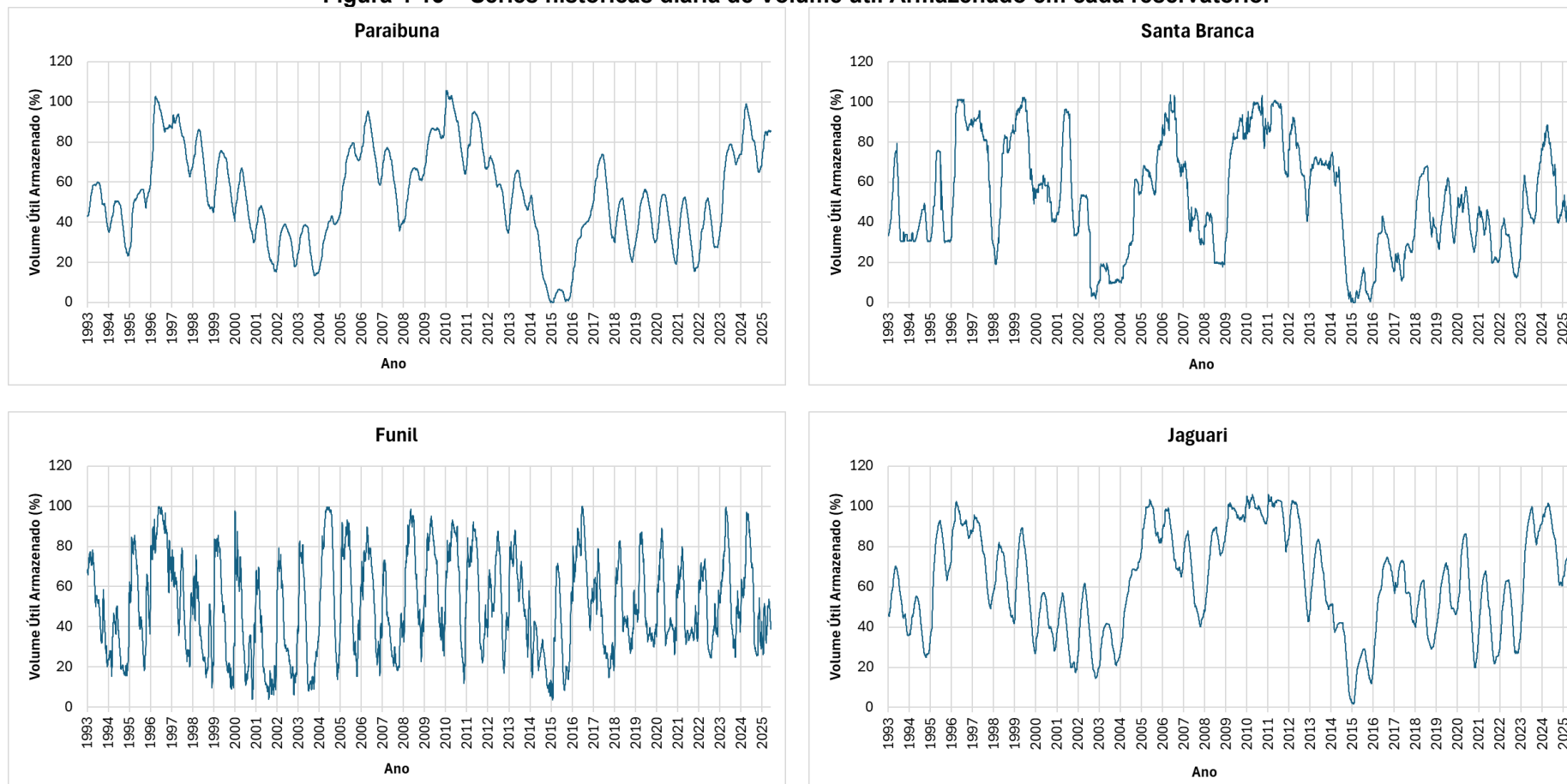
Figura 4-12 – Série temporal do volume útil armazenado, em relação ao volume útil total do Reservatório Equivalente



Fonte: elaborado pelo Consórcio a partir de dados do ONS.

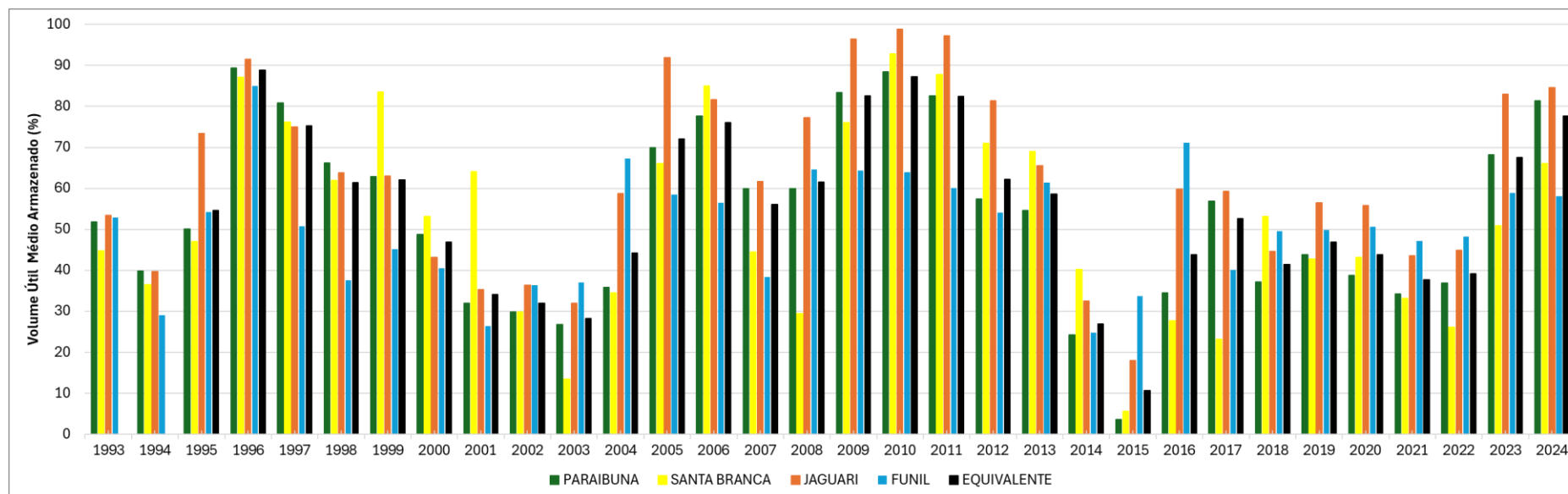
As séries históricas dos volumes armazenados individualmente em cada reservatório são apresentadas na Figura 4-13. De maneira geral verifica-se comportamento similar entre as séries dos reservatórios dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari, todos apresentando de maneira bem pronunciada as crises hídricas de 2001-2003 e 2014-2016. O reservatório de Funil apresenta um comportamento diferente dos demais, onde os efeitos das crises hídricas não se apresentam de forma tão evidente. O comportamento da série histórica desse reservatório é marcado por elevada variabilidade nos volumes armazenados ao longo do período analisado, o que provavelmente se deve ao fato de sua regra operativa específica. O gráfico da Figura 4-14 apresenta as médias anuais do percentual de volume útil para cada um dos quatro reservatórios e para o Reservatório Equivalente, permitindo visualizar de forma mais clara a relação entre os volumes individuais e o comportamento agregado do sistema.

Figura 4-13 – Séries históricas diária de Volume útil Armazenado em cada reservatório.



Fonte: elaborado pelo Consórcio a partir de dados do ONS.

Figura 4-14 – Médias anuais dos volumes úteis para os quatro reservatórios analisados e o Reservatório Equivalente



Fonte: elaborado pelo Consórcio.

4.4.2. Histórico das Condicionantes de Operação

A análise do histórico de operação foi dividida em 3 períodos: operação anterior à crise hídrica, 2001-2003; operação imposta pela crise hídrica de 2001-2003, focando especialmente nas regras operativas determinadas pela Resolução ANA nº 211/2003; e, por fim, operação imposta pela crise hídrica de 2014-2016, apresentando as normativas de redução temporária dos limites de vazão e focando nas regras operativas determinadas pela Resolução ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015.

Operação anterior à crise hídrica de 2001-2003

Devido a sua complexidade, a sua importância e a diferentes configurações institucionais e legais, desde 1970, a operação do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul tem sido alvo de diversas regulamentações. Inicialmente, as regras operativas foram definidas por meio de decretos e normativas, dos quais destaca-se:

- Decreto nº 68.324 de 9 de março de 1971: aprovou o Plano de Regularização do Rio Paraíba do Sul, considerando os reservatórios de Santa Branca, Jaguari e Funil, e autorizou a construção do Reservatório de Paraibuna-Paraitinga. Esse Decreto manteve a autorização concedida anteriormente à LIGHT para desvio das águas do rio Paraíba do Sul na Usina Elevatória Santa Cecília até o máximo de 160 m³/s. Condição, ainda, a operação dos reservatórios à manutenção da descarga mínima a jusante da Usina Elevatória Santa Cecília em 90 m³/s, a partir da conclusão do Reservatório de Paraibuna-Paraitinga, e concedeu prazo de 180 dias para que o então Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE propusesse as regras operativas a serem adotadas pelos reservatórios do Rio Paraíba do Sul.
- Decreto nº 73.619, de 12 de fevereiro de 1974: designou o DNAEE como responsável pelo estabelecimento das normas operativas dos reservatórios;
- Portaria DNAEE nº 022, de 14 de fevereiro de 1977: DNAEE publicou as regras para a operação dos reservatórios do rio Paraíba do Sul na sua configuração final, a qual passou efetivamente a vigorar a partir de 28 de fevereiro de 1980;
- Decreto nº 81.436, de 09 de março de 1978: incluiu nas regras operativas a redução, em condições hidrológicas adversas, da descarga mínima a jusante da Usina Elevatória Santa Cecília para 71 m³/s, a critério do DNAEE. Apesar de tal Decreto não citar explicitamente a redução na vazão bombeada em Santa Cecília, infere-se tal redução em condições hidrológicas adversas para 119 m³/s (manutenção de 190 m³/s afluentes menos 71 m³/s de defluência).

Com fundamento nas regras estabelecidas nas legislações citada, o conjunto de reservatórios do rio Paraíba do Sul operou, desde fevereiro de 1980, com o objetivo de regularizar a vazão afluente à Usina Elevatória Santa Cecília em 250 m³/s em condições hidrológicas normais (160 m³/s para bombeamento e 90 m³/s para jusante), ou em 190 m³/s em condições desfavoráveis (119 m³/s para bombeamento e 71 m³/s para a jusante) (LIGHT, 2005).

Com a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em 2000, a definição das condições de operação de reservatórios passou a ser uma atribuição dessa Agência que, para reservatórios do setor elétrico, é realizada em articulação com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Nesse caso específico, a definição das condições de operação tem sido efetuada envolvendo também os Comitês de Bacia Hidrográfica, com participação dos usuários de recursos hídricos, do poder público em todas as suas esferas e dos órgãos da sociedade civil, em sintonia com os fundamentos de gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos (LIGHT, 2015). A ANA tem regulamentado as condicionantes de operação do sistema hídrico da bacia através de diversas normativas e resoluções que foram publicadas ao longo dos anos.

Operação estabelecida pela crise hídrica de 2001-2003: Resolução ANA nº 211/2003

De acordo com Freitas (2004), durante a crise hídrica dos anos 2000 foi verificado que as vazões naturais afluentes aos reservatórios Paraibuna e Jaguari (para o período de 1996 a 2001), foram inferiores às vazões médias de longo termo e que, a diminuição da precipitação média não foi suficiente para explicar o baixo nível de acumulação dos reservatórios da bacia.

Dessa forma, devido às dificuldades em recuperar os volumes úteis dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari e, considerando sua importância no abastecimento de água, na época, foi editada uma resolução com novas regras de operação, as quais foram definidas com o auxílio do modelo de rede de fluxo *AcquaNet* (Freitas, 2004). O estudo de Freitas (2004) teve o objetivo de testar cenários com diferentes valores de vazão defluente, ordem de prioridade de deplecionamento e restrições operativas. O Item 6.1 irá apresentar este estudo com maior detalhamento. A partir dessas análises, foi publicada a Resolução nº 211/2003.

A Resolução ANA nº 211, de 26 de maio de 2003, estabeleceu as regras para operação dos reservatórios e estruturas de transposição, definindo vazões mínimas a jusante dos barramentos (Quadro 4-4). A resolução também mantém o limite mínimo para a vazão média

de bombeamento em Santa Cecília em 119 m³/s (Decreto nº81.436/1978). Com isso, a afluência mínima que deveria ser garantida em Santa Cecília era de 190 m³/s (71 m³/s para a jusante e 119 m³/s para bombeamento). Dessa forma, o deplecionamento dos reservatórios para atender esta vazão mínima de afluência em Santa Cecília deveria observar a ordem de prioridade detalhada no Quadro 4-4, procurando manter o limite de 10% do volume útil dos mesmos. A exceção para a vazão mínima a jusante de Santa Cecília seria quando a vazão incremental entre Funil e Santa Cecília fosse maior que 110 m³/s: neste caso, a vazão emergencial de 71 m³/s a jusante de Santa Cecília deveria ser gradativamente aumentada até atingir o limite da vazão mínima normal de 90 m³/s. Essa resolução foi alterada por outras normativas, mas foi reestabelecida pela Resolução nº 465/2004.

Quadro 4-4 – Condicionantes de operação definidas na Resolução nº 211/2003

Reservatório	Descarga mínima a jusante	Ordem de prioridade de deplecionamento*
Funil	80 m ³ .s ⁻¹	1º
Santa Branca	40 m ³ .s ⁻¹	2º
Paraibuna	30 m ³ .s ⁻¹	3º
Jaguari	10 m ³ .s ⁻¹	4º
Santa Cecília	71 m ³ .s ⁻¹ (instantânea)	-
Pereira Passos	120 m ³ .s ⁻¹ (instantânea)	-

*Deplecionamento refere-se à diminuição do volume dos reservatórios.

Fonte: Resolução nº 211/2003

Conforme o Plano de Ações Complementares para a Gestão da Crise Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul (ANA, 2015), a estratégia de operação (até a crise hídrica 2014-2016) para atender a vazão mínima afluente em Santa Cecília era feita por meio de um balanço hídrico que definia a vazão defluente da UHE Funil e, por consequência, as vazões defluentes das usinas de Paraibuna e Jaguari, situadas a montante de Funil. De acordo com o documento citado, a estratégia de operação era diferente dependendo do período hidrológico:

- No período chuvoso, de novembro a abril, a geração era normalmente minimizada nas usinas de cabeceira, Jaguari e Paraibuna, dimensionada apenas para atender às defluências mínimas destes reservatórios;
- No período seco, de maio a outubro, a geração das usinas de cabeceira era utilizada para complementar os requisitos de afluência, para atender a vazão mínima afluente em Santa Cecília. O armazenamento da UHE Funil era conduzido a seu armazenamento mínimo previsto, 10% do volume útil, para posteriormente serem utilizados os recursos dos reservatórios de cabeceira.

Operação estabelecida pela crise hídrica de 2014-2016: Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015

As regras operativas da Resolução 211/2003 permaneceram em vigor até a crise hídrica de 2014. No ano de 2014, a bacia vivenciou uma estiagem severa, até então nunca registrada, a qual se prolongou também nos anos seguintes, conforme comentado no Item 4.3.1 e 4.4.1. Além disso, como parte das medidas contingentes para a crise hídrica, em fevereiro de 2018 entrou em operação a transposição de água da bacia do rio Paraíba do Sul para o reservatório Atibainha no Sistema Cantareira (o qual foi descrito e apresentado em detalhes no Item 4.2.2). As condicionantes operativas desta transposição constam na Resolução ANA nº 1.931/2017 (ANA, 2017). A nova transposição trouxe um cenário de aumento da complexidade na gestão hídrica do estado do Rio de Janeiro associada à sua profunda dependência de uma bacia compartilhada e de gestão cada vez mais complexa (COSTA; BARCELLOS; FORMIGA-JOHNSSON, 2023).

Assim sendo, segundo Costa, Barcellos e Formiga Johnsson (2023), o acordo federativo em torno da segurança hídrica do estado do Rio de Janeiro face à proposta paulista de transpor águas da bacia do rio Paraíba do Sul, foi iniciado em 2014 e celebrado em novembro de 2015 entre a ANA, as Secretarias de Estado e órgãos gestores de recursos hídricos, e o Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (CEIVAP) e sua agência de bacia Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP) e homologado pelo STF em dezembro de 2015.

Destaca-se que durante o período de escassez hídrica de 2014 – 2016, foram publicadas normativas de redução temporária dos limites de vazão (Quadro 4-5), chegando a reduzir a vazão afluente mínima à barragem de Santa Cecília para 110 m³/s, sendo também limitadas as descargas mínimas a jusante de Paraibuna, Santa Branca, Funil e Jaguari.

Quadro 4-5 - Resoluções de redução temporária estabelecidas durante a crise hídrica 2014/2016

Resolução	Validade	Redução
Nº 700/2014	30/06/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 173 m³.s ⁻¹
Nº 898/2014	31/07/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 173 m³.s ⁻¹
Nº 1038/2014	15/08/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 165 m³.s ⁻¹
Nº 1072/2014	-	Afluência Santa Cecília - 190 para 165 m³.s ⁻¹
Nº 1309/2014	30/09/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 160 m³.s ⁻¹
Nº 1516/2014	31/10/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 160 m³.s ⁻¹
Nº 1603/2014	30/11/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 160 m³.s ⁻¹
Nº 1779/2014	31/12/2014	Afluência Santa Cecília - 190 para 160 m³.s ⁻¹
Nº 2048/2014	31/01/2015	Afluência Santa Cecília - 190 para 140 m³.s ⁻¹
Nº 2051/2014	31/01/2015	Afluência Santa Cecília - 190 para 140 m³.s ⁻¹
Nº 86/2015	28/02/2015	Afluência Santa Cecília - 190 para 140 m³.s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 34 m³.s ⁻¹

Resolução	Validade	Redução
		Jusante Jaguari - 10 para 7 m ³ .s ⁻¹
Nº 145/2015	30/06/2015	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 34 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 7 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 70 m ³ .s ⁻¹
Nº 205/2015	30/06/2015	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 30 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 70 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 25 m ³ .s ⁻¹
Nº 714/2015	31/10/2015	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 30 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 70 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 25 m ³ .s ⁻¹
Nº 1204/2015	31/01/2016	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 10 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 60 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 7 m ³ .s ⁻¹
Nº 65/2016	31/03/2016	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 10 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 60 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 7 m ³ .s ⁻¹
Nº 288/2016	31/05/2016	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 10 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 60 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 7 m ³ .s ⁻¹
Nº 561/2016	30/09/2016	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 10 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 60 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 7 m ³ .s ⁻¹
Nº 1188/2016	30/11/2016	Afluência Santa Cecília - 190 para 110 m ³ .s ⁻¹ Jusante Santa Branca - 40 para 10 m ³ .s ⁻¹ Jusante Jaguari - 10 para 4 m ³ .s ⁻¹ Jusante Funil - 80 para 60 m ³ .s ⁻¹ Jusante Paraibuna - 30 para 7 m ³ .s ⁻¹

Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Segundo Costa, Barcellos e Formiga Johnsson (2023), em 15 de janeiro de 2015, foi aprovado um relatório de avaliação do GT ANA-Estados-Agevap que continha a proposição de uma minuta de resolução com novas regras operativas do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul, para substituir a Resolução ANA nº 211/2003. O objetivo da Resolução Conjunta era privilegiar os usos múltiplos consuntivos, em especial o abastecimento humano, possibilitando um maior estoque de água nos reservatórios em detrimento do setor elétrico que teria menor flexibilidade de operação e disponibilizar um volume adicional de até 425 milhões de m³ ao

Sistema, oriundo da reserva técnica ('volume morto') do reservatório de Paraibuna, caso necessário em momentos de estiagens severas como a ocorrida em 2014 e 2015.

Assim, a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382, publicada em 07 de dezembro de 2015, revogou a Resolução nº 211/2003 estabelecendo novas condições de operação em resposta à maior crise hídrica em 85 anos na bacia do rio Paraíba do Sul. O contexto de publicação da Resolução nº 1382/2015 resultou em novas regras de operação que trouxeram maior segurança ao Sistema Hidráulico Paraíba do Sul, principalmente em anos mais secos. Destaca-se os seguintes aspectos da referida Resolução:

- Determinação de novos limites mínimos de descarga a jusante e de volume útil dos reservatórios para operação em cenários de deplecionamento (Quadro 4-6);
- Criação de uma reserva estratégica de 425 milhões de m³ no reservatório de Paraibuna para cenários de estiagens críticas;
- Instituição do Grupo de Assessoramento à Operação do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul (GAOPS) com o objetivo de realizar o acompanhamento permanente da operação do sistema hidráulico da bacia;
- Determinação de estudo anual, a ser elaborado pelo ONS, para atualização da curva de segurança de armazenamento para operação normal do sistema. Esta curva indica os volumes mínimos necessários no início de cada mês do período de estiagem, para que, caso se repita a série de vazões mais crítica do histórico, que é a do ano de 2014, se alcance o volume equivalente de 11,6%, no dia 01/12, correspondente à ponderação dos volumes previstos no 3º estágio de deplecionamento do Art. 1º da Resolução Conjunta. Quando o volume observado está abaixo da curva, é caracterizado um "estado de atenção" para o Sistema, entretanto, não significa a falta de água no sistema, já que os reservatórios têm água armazenada até o zero do volume útil, e há ainda uma "reserva estratégica" adicional ("volume morto") no reservatório de Paraibuna.

Quadro 4-6 – Condicionantes definidos na Resolução nº 1382/2015

Reservatório	Vazão mínima a jusante	Deplecionamento dos reservatórios			
		Limite mín. de volume útil: 1º estágio	Limite mín. de volume útil: 2º estágio	Limite mín. de volume útil: 3º estágio	Ordem de prioridade de deplecionamento*
Funil	70 m ³ .s ⁻¹	30%	30%	30%	1º
Santa Branca	30 m ³ .s ⁻¹	70%	40%	10%	2º
Paraibuna	10 m ³ .s ⁻¹	80%	40%	5%	3º

Reservatório	Vazão mínima a jusante	Deplecionamento dos reservatórios			
		Limite mín. de volume útil: 1º estágio	Limite mín. de volume útil: 2º estágio	Limite mín. de volume útil: 3º estágio	Ordem de prioridade de deplecionamento*
Jaguari	4 m ³ .s ⁻¹	80%	50%	20%	4º

*A mudança no estágio de deplecionamento, de cada reservatório para a próxima etapa, só pode ocorrer quando todos eles atingem seus valores mínimos para uma determinada etapa, sendo permitida uma variação de 5% do valor de referência.

Fonte: Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015

Vale mencionar que, além da Resolução ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015, as regras operativas do Sistema também são determinadas pelo Manual de Procedimentos da Operação, elaborado pelo ONS, que detalha as restrições operativas hidráulicas e informações operativas relevantes para os reservatórios da bacia. As principais condicionantes de operação apresentados no Manual de Regras operativas do ONS (2025) para os reservatórios de Funil, Santa Branca, Paraibuna e Jaguari são:

- **Funil:** possui cota mínima operacional de 449 m, referente a 15% do volume útil, mas permite operações excepcionais até 447,45 m (10% do VU). É o primeiro na ordem de deplecionamento com estágios de 30% do VU. A vazão máxima defluente é de 700 m³.s⁻¹ e a mínima é de 70 m³.s⁻¹, com taxa máxima de variação de 100 m³.s⁻¹.h⁻¹;
- **Santa Branca:** possui nível mínimo referente a 10% do VU e taxa mínima de deplecionamento de 10 cm por dia (excepcionalmente 15 cm por dia). É o segundo na ordem de deplecionamento, com estágios de 70%, 40% e 10% do VU. Sua vazão máxima defluente é de 300 m³.s⁻¹ e a mínima é de 30 m³.s⁻¹, com redução máxima permitida de 40 m³.s⁻¹ a cada 6 horas;
- **Paraibuna:** possui nível mínimo operacional de 5% do VU, entretanto pode ser operado em cotas menores para garantir vazões mínimas. É o terceiro reservatório na ordem de deplecionamento, com estágios de 80%, 40% e 5% do VU. A vazão defluente máxima é de 120 m³.s⁻¹ e a mínima a jusante é de 10 m³.s⁻¹;
- **Jaguari:** seu nível mínimo é referente a 20% do volume útil e é o quarto na ordem de deplecionamento, com estágios de 80%, 50% e 20% do VU. A vazão máxima do conduto forçado é de 60 m³.s⁻¹ e a mínima a jusante é de 4 m³.s⁻¹. Em relação a transposição para o reservatório de Atibainha, sua vazão média anual de captação não pode passar de 5,13 m³.s⁻¹ e sua vazão máxima é de 8,5 m³.s⁻¹.

Resumo da evolução das condicionantes de operação de vazão mínima

O Quadro 4-7 sistematiza a evolução normativa das vazões mínimas estabelecidas em diferentes pontos de controle hidráulico do sistema Paraíba do Sul entre 1971 e 2015, evidenciando mudanças nos valores de referência e nos critérios de aplicação definidos por decretos, portarias e resoluções. A primeira normativa que definiu, de forma mais ampla, as vazões mínimas para diferentes pontos de controle da bacia, foi a Portaria DNAEE nº 022/1977. Nesta portaria é possível observar que o reservatório de Jaguari possuía duas vazões mínimas, uma para o período chuvoso (10 m³/s), e uma no período seco (junho a novembro), sendo de 42 m³/s. Essa distinção não foi mantida em normativas posteriores, permanecendo o menor valor (10 m³/s) na Resolução nº 211/2003, reduzida para 4 m³/s na Resolução nº 1382/2015.

A partir das Resoluções de 2003 e 2015, editadas em contextos de crise hídrica extrema, observa-se a redução nos valores de vazão mínima a jusante dos reservatórios de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Santa Cecília, configurando alterações das restrições para viabilizar a operação do sistema em condições críticas e priorizar os usos múltiplos da água. Destaca-se, também, que foi a partir de 2003 que se começou a regulamentação sobre a ordem de deplecionamento dos reservatórios, o que antes não era especificado em nenhuma normativa ou legislação.

Para a UHE Pereira Passos, a normatização de definição de vazão mínima a jusante ocorreu apenas a partir da Resolução nº 211/2003, sendo mantida com o mesmo valor (120 m³/s) em 2015.

Em síntese, a trajetória normativa revela um processo de ajustes progressivos, nos quais as crises hídricas atuaram como gatilho para revisões das vazões mínimas, ao mesmo tempo em que se reforçou o controle sobre pontos de transposição e bombeamento, dada sua relevância para a gestão integrada da bacia.

Quadro 4-7 – Resumo das restrições de vazões mínimas estabelecidas ao longo dos anos.

Trecho/Localização	Vazões mínimas (m³/s) estabelecidas por diferentes decretos					
	Decreto nº 68.324/1971	Portaria DNAEE nº 022/1977	Decreto nº 81.436/1978	Resolução nº 211/2003	Resolução nº 1382/2015	Escala de tempo da vazão
Jusante de Paraibuna	-	30	-	30	10	Instantânea
Jusante de Santa Branca	-	40	-	40	30	Instantânea
Jusante de Jaguari	-	10 e 42 no período seco anual (junho a novembro)	-	10	4	Instantânea
Jusante de Funil	-	80	-	80	70	Instantânea

Trecho/Localização	Vazões mínimas (m³/s) estabelecidas por diferentes decretos					
	Decreto nº 68.324/1971	Portaria DNAEE nº 022/1977	Decreto nº 81.436/1978	Resolução nº 211/2003	Resolução nº 1382/2015	Escala de tempo da vazão
Jusante da estação elevatória de Santa Cecília	90	90	90 em condições hidrológicas normais e 71 em condições hidrológicas adversas	71	71	Instantânea
Bombeamento Santa Cecília	-	100	160 em condições hidrológicas normais e 119 em condições hidrológicas adversas	119	119	Média diária
Afluência Santa Cecília*	-	190	Por inferência: 250 em condições hidrológicas normais e 190 em condições hidrológicas adversas	190	190	-
Jusante de Pereira Passos	-	-	-	120	120	Instantânea

*A afluência mínima que deve ser garantida em Santa Cecília é a soma da vazão mínima de jusante de Santa Cecília e da vazão de bombeamento para a transposição do sistema Guandu.

Fonte: adaptado de Freitas, 2004.

5. AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015

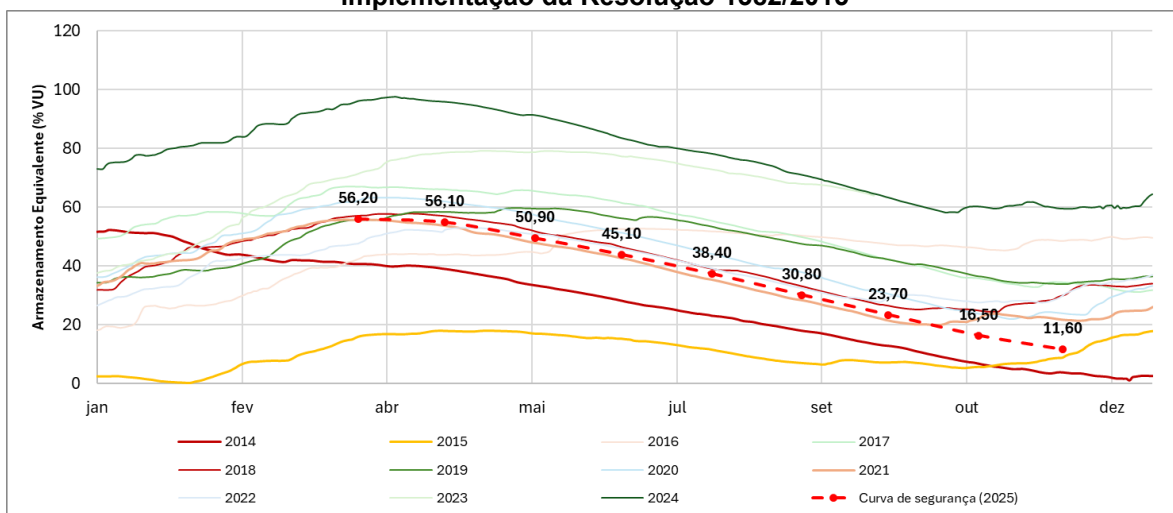
Este capítulo apresenta uma análise crítica da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015, apresentando a evolução dos volumes do sistema após a implementação, uma análise da produção de energia, bem como sugestões de aprimoramento para a resolução. Anteriormente, no Item 4.4.2, foram apresentadas as condicionantes de operação definidas por esta resolução.

5.1. ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO DOS VOLUMES DO SISTEMA

Após a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015 entrar em vigência, verificou-se, nos primeiros anos, que as condicionantes de operação garantiram uma maior segurança ao sistema. Conforme previsto no Art. 3º da Resolução Conjunta, o ONS estabeleceu uma curva de segurança de armazenamento para a operação do sistema. A Figura 5-1 apresenta a curva de segurança de armazenamento para a operação normal do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul (2025) e a evolução do armazenamento equivalente em alguns dos anos após a publicação da resolução.

Verifica-se que em 2021 o volume chegou a ficar abaixo da curva de segurança, levando à adição de medidas excepcionais como o reforço de água para o Sistema Cantareira (SP). Mesmo assim, a Resolução contribuiu significativamente para a otimização da reserva de água para os múltiplos usos, para a governança e para o acompanhamento do sistema como um todo (COSTA *et al.*, 2023).

Figura 5-1 – Curva de segurança de armazenamento para a operação normal do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul (2025) e Armazenamento Equivalente ano a ano após a implementação da Resolução 1382/2015



Fonte: elaborado pelo Consórcio.

Também se destaca a recuperação dos volumes armazenados, chegando a quase 100 % da capacidade do Reservatório Equivalente no ano 2024, situação que não era vivenciada na Bacia Paraíba do Sul desde o ano de 2010 (conforme pode ser verificado na evolução dos volumes armazenados apresentada anteriormente no Item 4.4.1). No entanto, essa recuperação não pode ser atribuída apenas às regras de operação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA N° 1382/2015, mas também ao período hidrológico mais favorável vivenciado nos últimos anos (conforme descrito no Item 4.3.1).

5.2. ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Conforme mencionado no Item 4.4.1 a Política de Operação do Sistema Hidráulico da bacia do Paraíba do Sul tem como objetivo atender, prioritariamente, aos requisitos de uso múltiplo da água. A geração de energia elétrica é consequência dos requisitos hidráulicos da bacia, ditadas pelas restrições de uso múltiplo.

De todo modo, foi feita uma análise da geração diária de energia (dados obtidos de ONS, s.d.) nas usinas da cascata do rio Paraíba do Sul antes e depois da implementação da Resolução n.º 1.382/2015. A Figura 5-2 apresenta a geração diária de energia (dados obtidos de ONS, s.d.) com as respectivas médias diárias de geração de energia (MW) antes e depois da implementação da Resolução. Ainda que algumas usinas tenham entrado em operação antes de 2000, os registros de geração só estão disponíveis a partir desse ano; por essa razão, o intervalo analisado corresponde a 2000-2024. O Quadro 5-1 consolida tais resultados, confrontando-os com as vazões afluentes médias de longo prazo. O período de referência pré-resolução compreende 2000-2014, enquanto o pós-resolução abrange 2015-2024. Foram consideradas apenas as usinas da cascata do Paraíba do Sul, cuja operação é diretamente influenciada pela Resolução n.º 1.382/2015. A UHE Simplício, embora também pertença à cascata, foi desconsiderada na comparação porque iniciou operação em 2013, não dispondo de série histórica suficiente para um cálculo condizente da média pré-resolução.

Nota-se a partir da Figura 5-2 que os patamares de geração de energia em todas as usinas iniciam uma queda vertiginosa no ano de 2013, ocasionada naturalmente pelo início da crise hídrica e a diminuição na oferta de vazões. Esses patamares sobem novamente por volta de 2016-2017, porém sem atingir novamente os valores pré-resolução, seguindo em níveis menores nos anos seguintes. Essas reduções na geração de energia não podem ser atribuídas exclusivamente ao efeito da Resolução, já que no período pós-resolução também foi observada uma redução nas vazões afluentes aos reservatórios (conforme pode ser

observado no Quadro 5-1 e apresentado anteriormente no Item 4.3.1). Dentre as UHEs, somente a UHE Funil apresenta valores de redução nas vazões afluentes e geração de energia similares (próximos de 17%), enquanto as demais apresentam pares de redução variados.

Analisando o sistema conjuntamente, há uma redução média na geração de energia de cerca de 24% quando comparado o período pré-resolução com o período pós-resolução. Destaca-se que a UHE Ilha dos Pombos, localizada no terço final da bacia do Paraíba do Sul, apesar de apresentar uma redução abaixo da média, também possui influência de outras variáveis fora as condicionantes de operação das usinas analisadas, como aporte de vazões provenientes de outras sub-bacias (que possuem suas características e dinâmicas próprias), bem como a influência da operação da UHE Simplício.

Quadro 5-1 – Geração de energia média diária, vazão natural afluente e suas variações

Usina	Qmlt vazão afluente pré-Resolução (m³/s)	Qmlt vazão afluente pós-Resolução (m³/s)	Redução	Geração Média pré-Resolução (MW)	Geração Média pós-Resolução (MW)	Redução
Paraibuna	63,04	59,02	6,4%	42,06	33,28	20,9%
Santa Branca	73,94	61,29	17,1%	24,56	17,19	30,0%
Jaguari	23,79	20,32	14,6%	10,42	7,22	30,7%
Funil	205,90	171,44	16,7%	104,04	86,12	17,2%
Ilha dos Pombos	384,05	338,03	12,0%	87,72	69,34	21,0%

Fonte: elaborado pelo consórcio.

Tendo em vista que o período pós-resolução apresenta, no geral, vazões afluentes médias menores do que no período pré-resolução, é necessário também realizar essa avaliação da redução de produção de energia em anos com vazões afluentes próximas aos patamares pré-resolução. Para tal, foi escolhido um recorte entre os anos de 2022-2024, que apresentaram de maneira geral um comportamento acima da média nas vazões (como demonstrado no item 4.3.1). Ao analisar este recorte temporal (Quadro 5-2), verifica-se que o percentual de redução na geração de energia diminui (comparativamente com as reduções utilizando todo período pós-resolução), chegando a cair pela metade para a UHE Paraibuna e em aproximadamente um terço nas UHEs Funil e Ilha dos Pombos. A única UHE que não sofre uma mudança considerável ao analisar os diferentes períodos é Jaguari, que continua com uma redução na produção por volta de 30%.

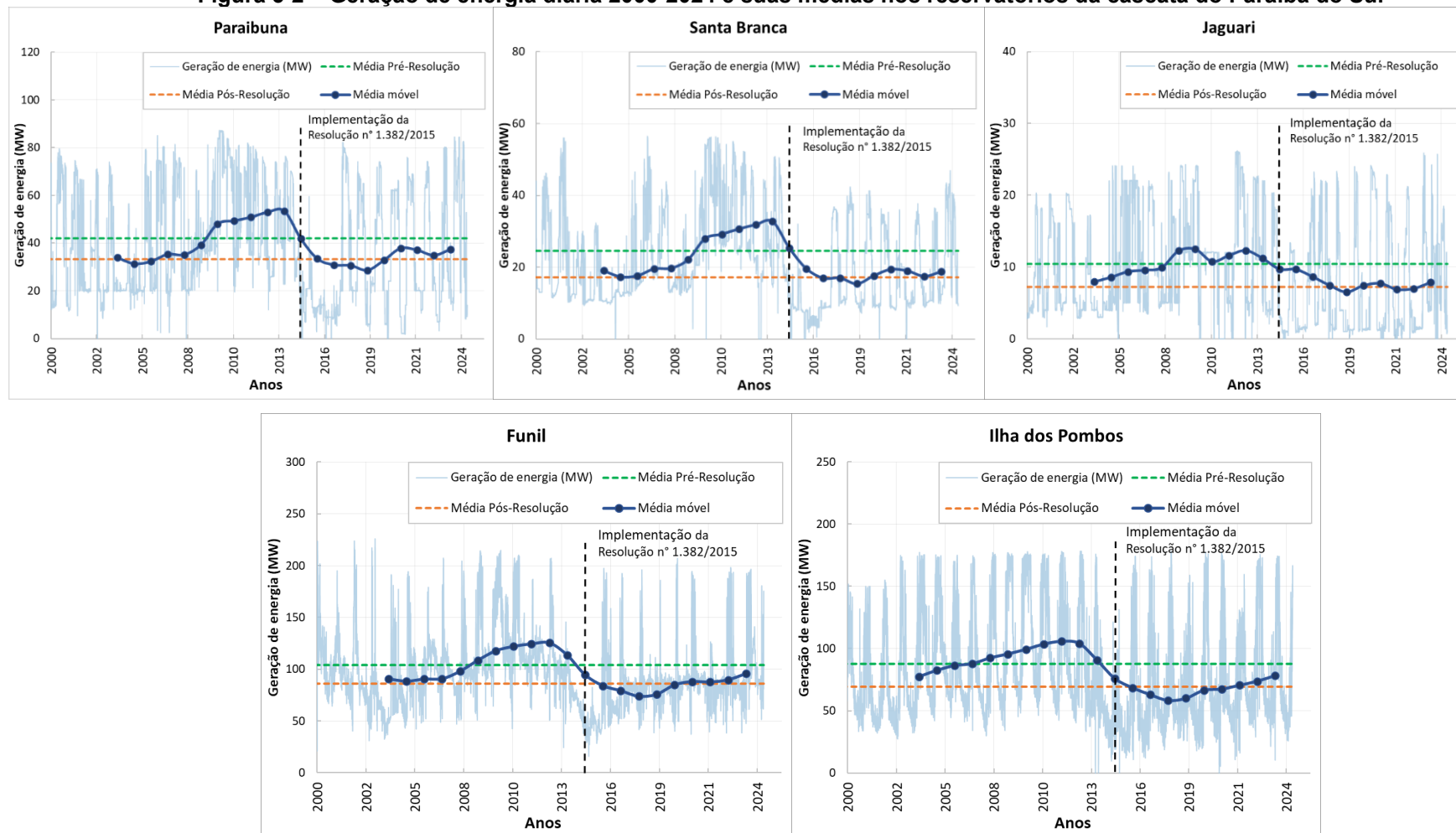
Quadro 5-2 – Comparação de geração de energia média diária e vazão média afluyente pré-resolução e no período recente

Usina	Qmlt vazão afluyente pré- Resolução (m³/s)	Vazão média afluyente 2022-2024 (m³/s)	Geração Média pré-Resolução (MW)	Geração Média 2022- 2024 (MW)	Redução
Paraibuna	63,04	70,77	42,06	37,77	10,2%
Santa Branca	73,94	64,06	24,56	19,67	19,9%
Jaguari	23,79	21,79	10,42	7,50	28,1%
Funil	205,90	193,30	104,04	97,08	6,7%
Ilha dos Pombos	384,05	418,75	87,72	81,22	7,4%

Fonte: elaborado pelo Consórcio

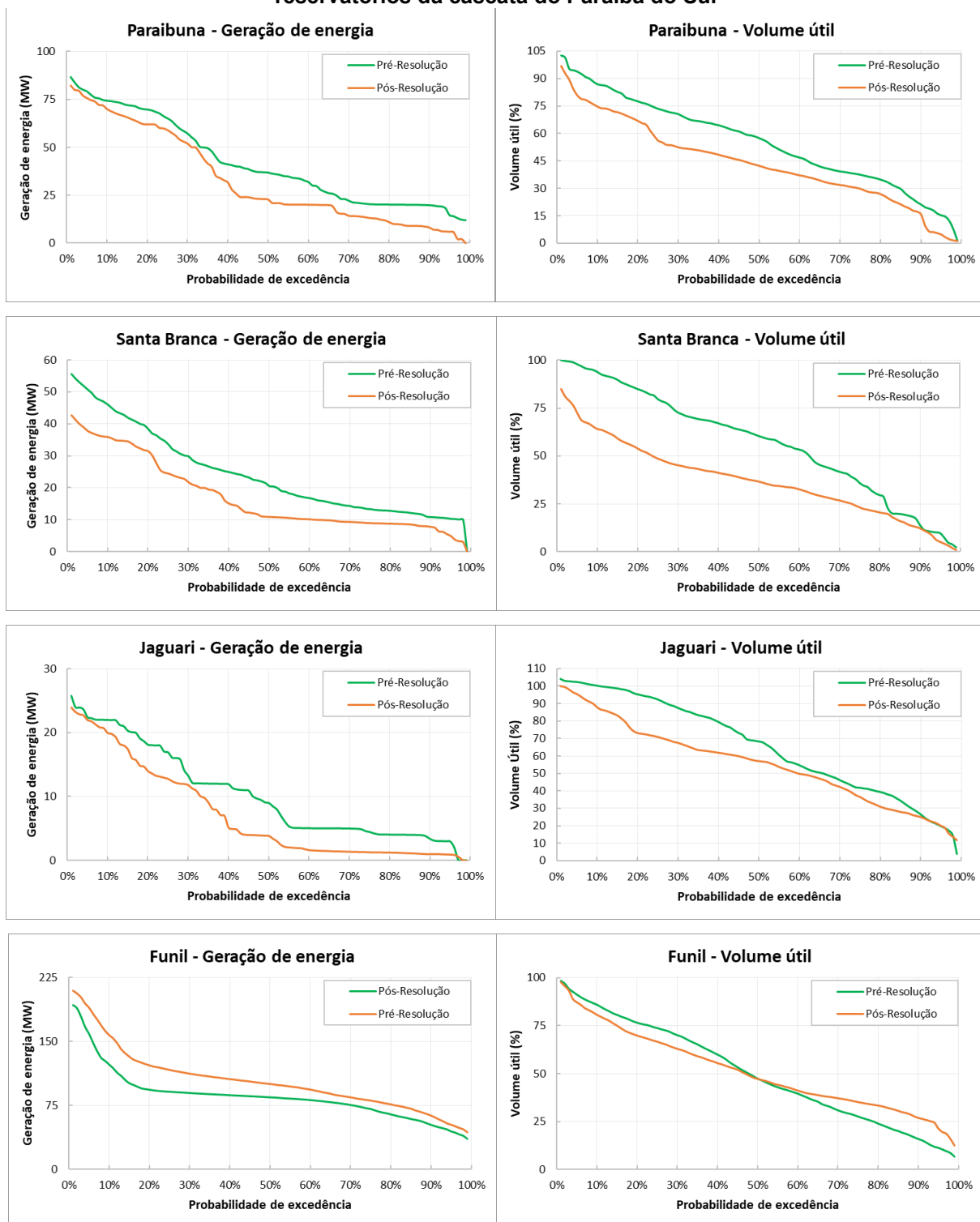
A Figura 5-3 apresenta as curvas de permanência de geração de energia diária em conjunto com os volumes úteis dos reservatórios, que representam o percentual do tempo em que determinado patamar de energia/volume é igualado ou superado. Observa-se de forma geral uma diminuição considerável nos patamares de geração de energia nas curvas pós-resolução, variando entre as usinas. As UHEs Funil e Ilha dos Pombos apresentam comportamento similar, com gerações máximas e mínimas próximas nos dois períodos e gerações intermediárias com maiores diferenças, indicadas pelo distanciamento das curvas para as probabilidades de ocorrência entre 10% e 90%. Já em relação aos volumes úteis, o comportamento é semelhante entre Paraibuna, Jaguari e Santa Branca, com uma diminuição clara em praticamente todas as permanências no período pós-resolução. A exceção é o reservatório do Funil, que apresenta um aumento nas vazões armazenadas a partir de 50% de probabilidade, ou seja, os volumes úteis estão em patamares maiores com altas frequências. Esta relação indica que tal reservatório, localizado a jusante dos demais citados e a montante de Santa Cecília, é extremamente estratégico para a operação do sistema, influenciando nos demais, possuindo um aumento significativo em sua reservação no período pós-resolução.

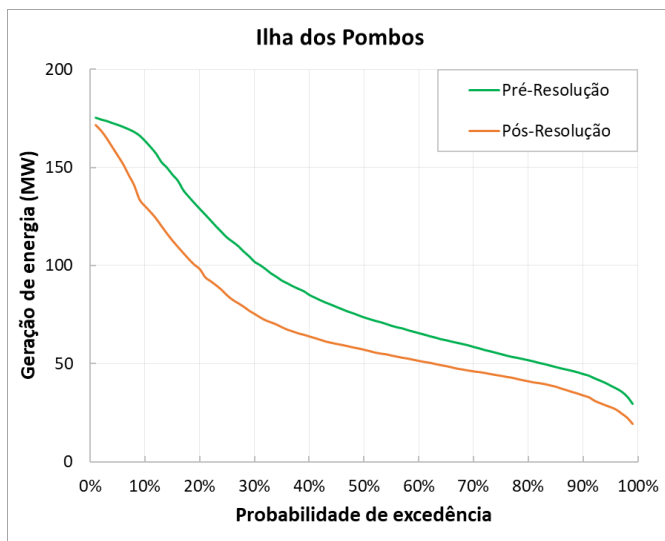
Figura 5-2 – Geração de energia diária 2000-2024 e suas médias nos reservatórios da cascata do Paraíba do Sul



Fonte: elaborado pelo Consórcio a partir de dados do ONS

Figura 5-3 – Curvas de permanência de geração de energia diária e volume útil dos reservatórios da cascata do Paraíba do Sul





Fonte: elaborado pelo Consórcio a partir de dados do ONS.

6. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE A OPERAÇÃO DO SISTEMA HÍDRICO PARAÍBA DO SUL

6.1. ESTUDO 1 - REGRAS DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL / SISTEMA GUANDU (FREITAS, 2004)

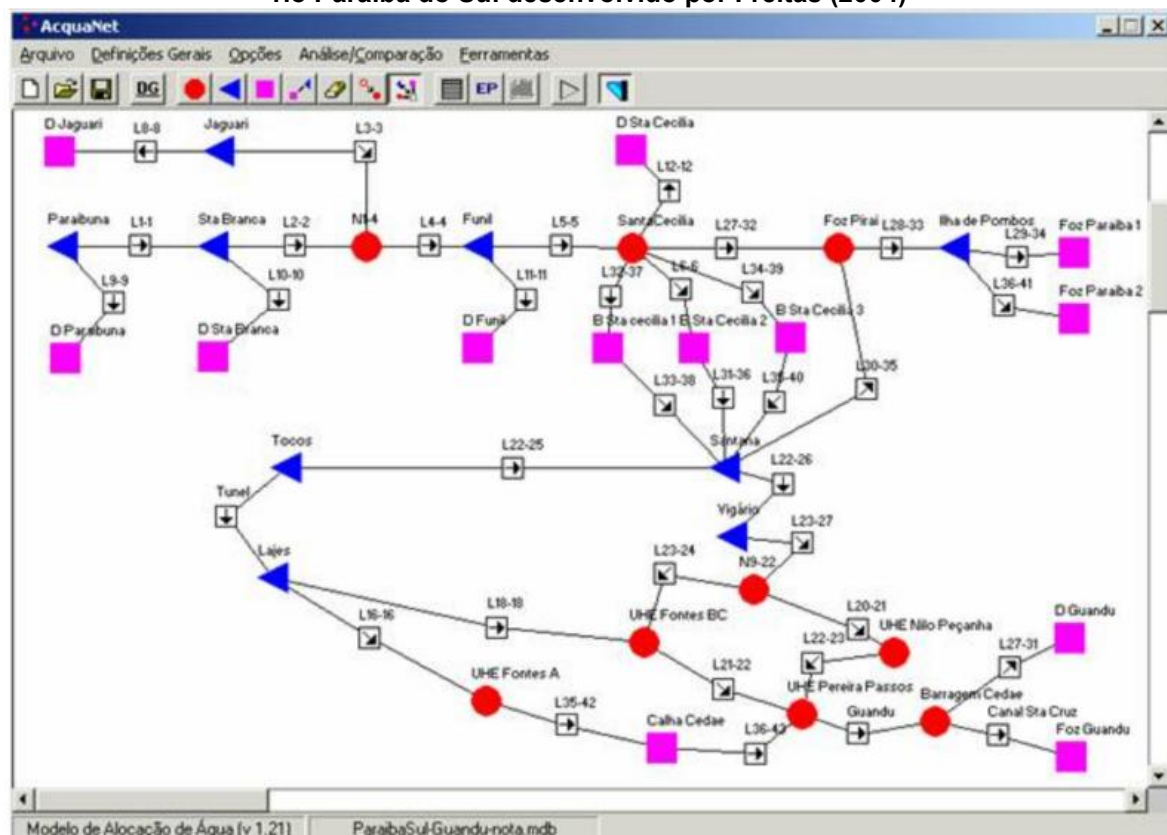
Conforme mencionado anteriormente (Item 4.4.2), durante a crise hídrica dos anos 2000 foi verificado que as vazões naturais afluentes aos reservatórios Paraibuna e Jaguarí (para o período de 1996 a 2001), foram inferiores às vazões médias de longo termo e que a diminuição da precipitação média não foi suficiente para explicar o baixo nível de acumulação dos reservatórios da bacia.

Nesse sentido, o estudo de Freitas (2004) analisa criticamente as regras de operação vigentes até 2002, as quais são baseadas no Decreto nº 68.324/1971, na Portaria DNAEE nº 022/1977 e no Decreto nº 81.436/1978 (apresentados anteriormente no Quadro 4-7). Para fundamentar essa avaliação, o estudo apresenta gráficos que retratam as séries históricas de vazões afluentes e defluentes para o reservatório de Paraibuna e Jaguarí, possibilitando uma compreensão mais detalhada do comportamento hidrológico do sistema e das limitações associadas ao marco regulatório então vigente. Devido às dificuldades em recuperar os volumes úteis dos reservatórios, as regras operacionais vigentes, estabelecidas ainda nas décadas de 1970, mostraram-se insuficientes para garantir o equilíbrio entre os múltiplos usos da água.

A partir disso, o estudo elabora um sistema de suporte à decisão sobre a operação dos reservatórios do Paraíba do Sul utilizando o software *AcquaNet* (Figura 6-1). Foram realizadas uma série de simulações envolvendo diferentes cenários de vazões defluentes, possibilitando a elaboração de um conjunto de normas operacionais voltadas a maximizar o aproveitamento dos recursos hídricos e manter as vazões regularizadas no sistema.

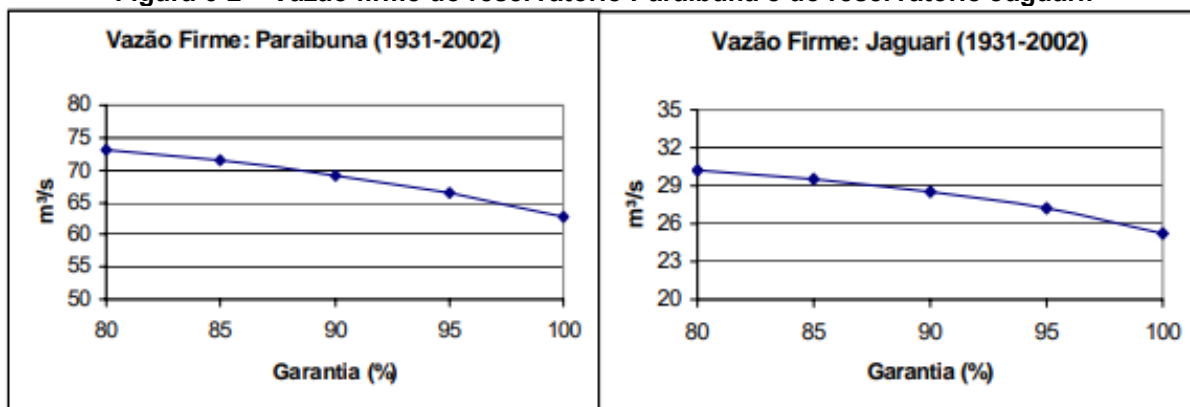
As simulações realizadas por Freitas (2004) no modelo *AcquaNet* trouxeram como resultado a definição das vazões firmes dos reservatórios de Paraibuna e Jaguarí, considerando a série histórica de 1931 a 2002. O estudo indica que Paraibuna apresentou uma vazão regularizada de 62,78 m³/s com 100% de garantia, equivalente a 90,97% da sua vazão média de longo termo, enquanto Jaguarí obteve 25,2 m³/s, correspondendo a 87,74% da média histórica.

Figura 6-1 – Representação do modelo de operação dos reservatórios (AquaNet) da bacia do rio Paraíba do Sul desenvolvido por Freitas (2004)



Fonte: Freitas, 2004

Figura 6-2 – Vazão firme do reservatório Paraibuna e do reservatório Jaguari.



Fonte: Freitas, 2004

Por fim, o estudo relata que, a partir das simulações realizadas com o modelo *AcquaNet* e das articulações com o ONS e os comitês de bacia, foi publicada a Resolução nº 211/2003 da ANA, estabelecendo novas regras emergenciais de operação para o sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul e para a transposição ao sistema Guandu. Entre as medidas definidas, destacam-se os limites mínimos de descarga a jusante dos principais reservatórios (30 m³/s

em Paraibuna, 40 m³/s em Santa Branca, 10 m³/s em Jaguari e 80 m³/s em Funil), bem como as restrições para Santa Cecília (71 m³/s a jusante e 119 m³/s para bombeamento). A resolução também definiu que o deplecionamento dos reservatórios deveria seguir a ordem de prioridade: Funil, Santa Branca, Paraibuna e Jaguari, mantendo pelo menos 10% do volume útil, com possibilidade de revisão dessa ordem conforme as condições hidrológicas observadas.

6.2. ESTUDO 2 - AVALIAÇÃO DE OPERAÇÕES ALTERNATIVAS PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL (MELO, 2017)

O estudo de Melo (2017), intitulado “Avaliação de Operações Alternativas Para a Gestão de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul”, teve como objetivo principal realizar uma avaliação integrada da operação da bacia do rio Paraíba do Sul (BRPS) utilizando o Modelo de Avaliação e Planejamento de Águas (WEAP). Foram comparadas diferentes alternativas de regras operacionais por meio de simulações numéricas, com o intuito de contribuir para uma melhor avaliação e gestão dos recursos hídricos. A Figura 6-3 apresenta o esquema da bacia no modelo WEAP. Esse modelo foi adotado por sua interface amigável e fácil operação, ele determina a alocação ótima de água, maximizando a satisfação da demanda seguindo uma ordem de prioridade. Para o modelo da BRPS, o referido estudo adotou como prioridade máxima a demanda de abastecimento de água, seguida das vazões mínimas a jusante dos reservatórios e, por último, a geração de energia.

Figura 6-3 – Modelo WEAP da bacia do rio Paraíba do Sul desenvolvido por Melo (2017).



Fonte: Melo, 2017

Os dados de entrada do modelo desenvolvido por Melo (2017) incluíram séries históricas de produção hidrelétrica, armazenamento e vazão dos reservatórios para o período de 1931 a 2016, parâmetros dos reservatórios (tais como regras operativas, capacidade instalada, curva cota x área x volume, entre outros), rede hidrográfica da bacia, e demandas mensais agregadas por município e tipo de uso.

Os dados de geração de energia no referido estudo foram calibrados com o software Eureka e com uma curva de restrição de vazões mínimas, permitindo estimar a produção de energia da forma mais realista para a variação de produção do sistema interligado, representando o seu aumento em meses de afluência favorável com maior armazenamento nos reservatórios. Essa curva foi elaborada com base no estudo “*Range and Deficit Analysis Using Markov Chains*” (GOMIDE, 1975), que definiu curvas que relacionam a vazão liberada a jusante dos reservatórios, seu volume útil e o coeficiente de variação do rio. No estudo elaborado por Melo (2017), como simplificação, foi adotado um único coeficiente de variação que fosse representativo para a bacia inteira, tendo como objetivo reproduzir a curva correspondente estudada por Gomide (1975). Utilizou-se uma aproximação quadrática entre vazão e porcentagem de armazenamento, com coeficiente de variação fixo de 30% para o escoamento do curso principal da bacia do Paraíba do Sul. Após esses ajustes, os resultados produzidos pelo modelo se mostraram satisfatórios (R^2 entre 0,48 e 0,75) quando comparado a simulação de referência com o histórico de produção de energia do ONS.

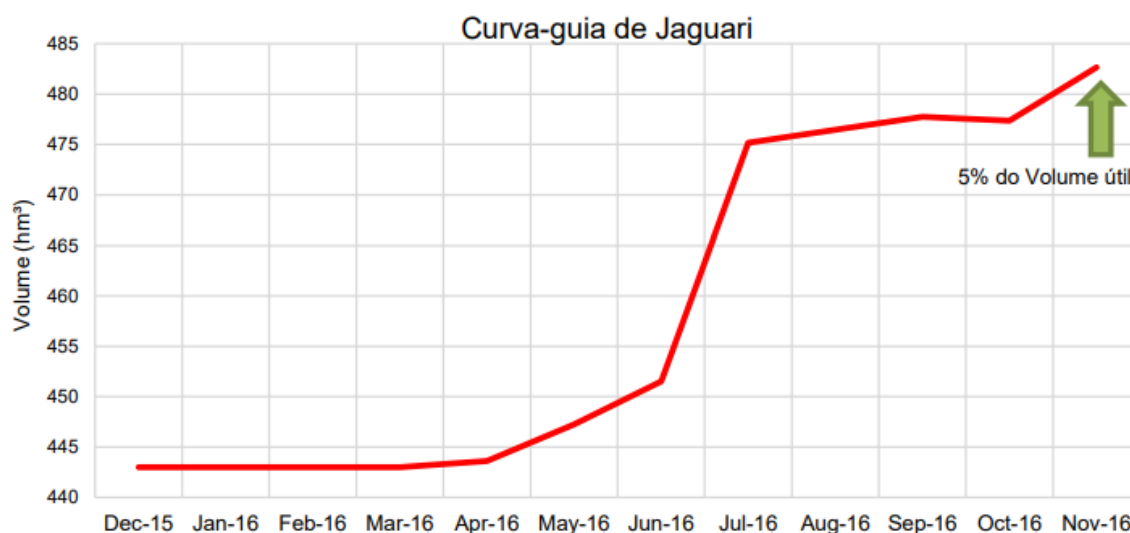
O estudo utilizou etapas mensais de tempo com dados de vazões afluentes de 1931 a novembro de 2016. Três simulações foram avaliadas no WEAP para distintas regras operacionais na BHPS, sendo elas:

- Cenário de Referência: regras operativas anteriores à crise de 2014 – 2015, baseadas na Resolução nº 211/2003 com os requisitos mínimos de vazão da mesma. Este cenário é usado como uma linha de base para comparação com as outras duas simulações. Trata-se de um cenário no qual não havia preocupação em priorizar o atendimento às demandas em detrimento da geração de energia;
- Cenário de Operação Pós-Crise: regras estabelecidas após a crise hídrica, conforme a Resolução nº 1382/2015. Trata-se do cenário onde foram implementadas medidas com o objetivo de conter a crise, priorizando o armazenamento de água nos reservatórios e o atendimento às demandas de abastecimento público, a fim de recuperar os volumes que se encontravam em estado crítico; e,

- Cenário Alternativo: operação baseada no uso de curvas-guia, assegurando um mínimo de 5% do volume útil no final da estação seca (novembro), considerando, portanto, a pior condição hidrológica.

As curvas-guia do Cenário Alternativo foram elaboradas a partir da análise do histórico de vazões afluentes e admitindo a pior condição hidrológica, na qual a vazão de jusante dos reservatórios é igual à vazão ecológica. Foram elaboradas curvas para todos os anos do histórico, sendo selecionada a curva de 2016 (Figura 6-4) por apresentar os volumes mais críticos. Essa alternativa é mais simples que a proposta na Resolução nº 1382/2015, uma vez a operação é independente do funcionamento dos outros reservatórios. De acordo com Melo (2017), é também bastante próxima a um conceito usado pelo ONS ao estipular “curvas de aversão ao risco” para a geração elétrica

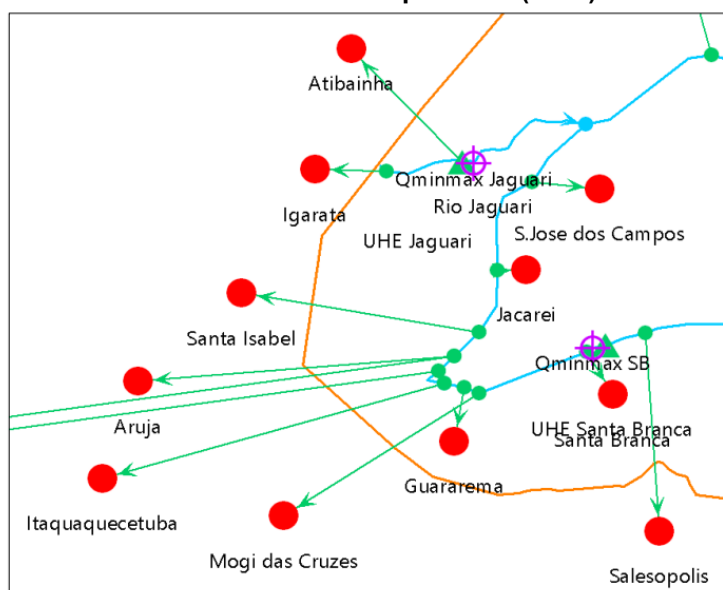
Figura 6-4 – Curva-guia para o reservatório de Jaguari elaborada por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017.

Além disso, o estudo avaliou os impactos da transposição das águas do reservatório de Jaguari para o reservatório de Atibainha com o intuito de verificar o impacto no sistema interligado dos reservatórios e na segurança hídrica do estado do Rio de Janeiro. Foram testados três cenários de transposição como uma nova demanda (Figura 6-5): sem retirada de água, com uma retirada de 5,13 m³/s (vazão média da transposição) e com retirada de 8,5 m³/s (vazão máxima possível).

Figura 6-5 – Criação de um ponto de demanda para simular a retirada de água para Atibainha no WEAP elaborado por Melo (2017)

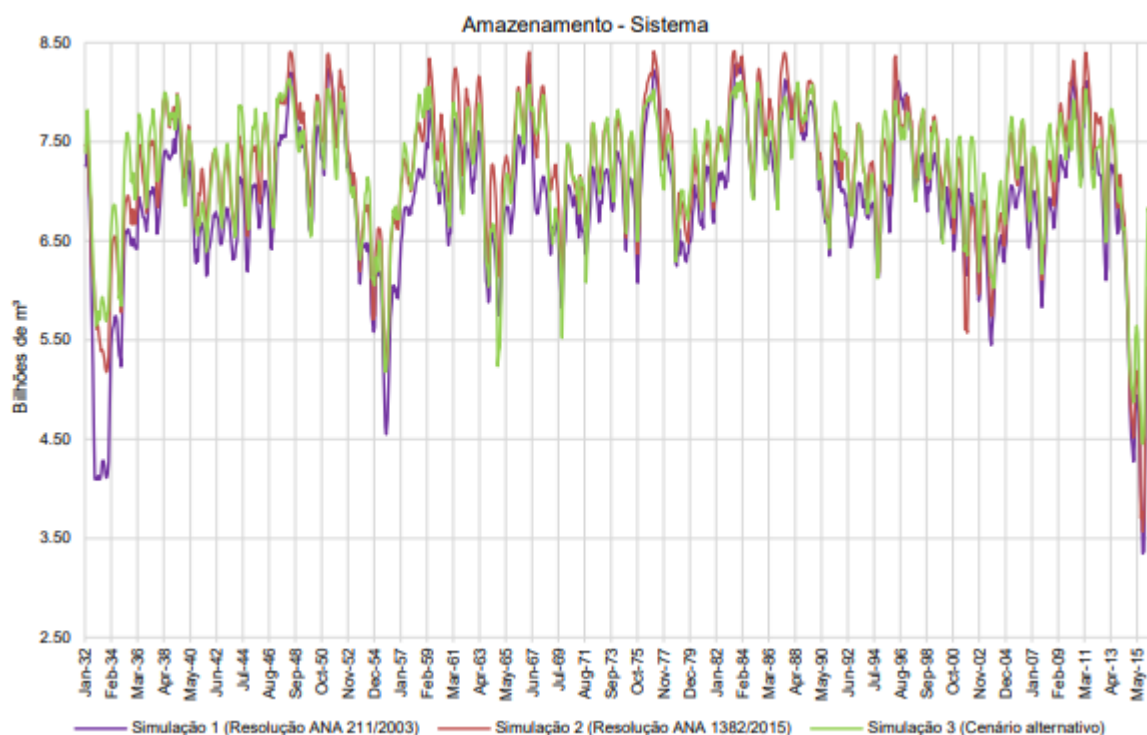


Fonte: Melo, 2017

A análise dos resultados do estudo de Melo (2017) foi realizada com base no volume armazenado nos reservatórios e na sua geração hidrelétrica, permitindo analisar o *trade-off* existente entre a confiabilidade do abastecimento de água e a produção de energia hidrelétrica. Também foi avaliada a curva de permanência em Santa Cecília, devido a sua importância para o abastecimento do estado do Rio de Janeiro. Além disso, verificou-se a ocorrência de demandas hídricas não atendidas, principalmente nos cenários que consideraram a transposição para Atibainha.

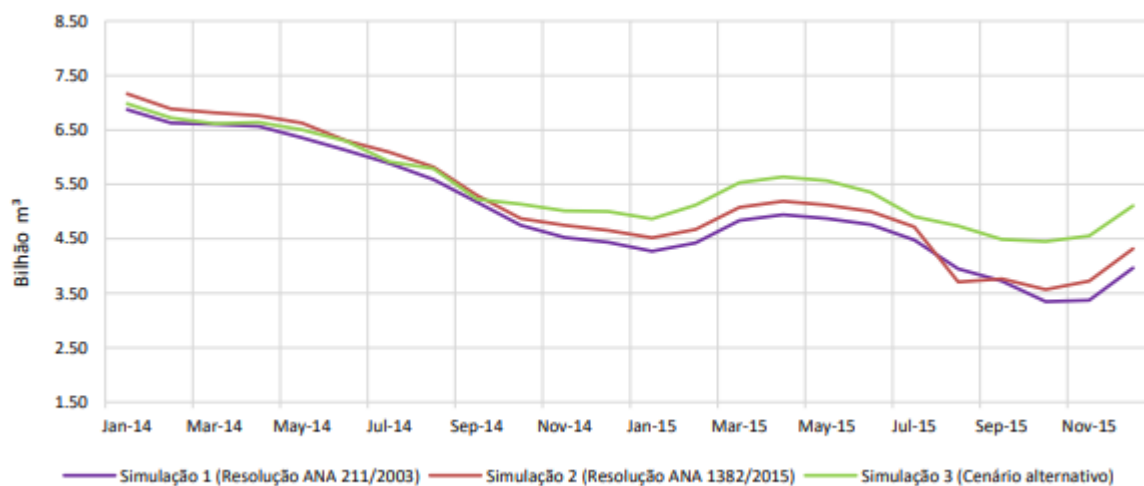
A Figura 6-6 apresenta o volume total armazenado no sistema em cada um dos três cenários, nota-se que o Cenário de Referência apresenta um menor volume, enquanto o Cenário de Operação Pós-Crise e o Cenário Alternativo resultaram em maiores volumes ao longo do tempo de simulação. Já a Figura 6-7 detalha o período da crise hídrica de 2014 – 2015, evidenciando que o Cenário Alternativo apresenta maior volume armazenado na maior parte dos meses.

Figura 6-6 – Volume armazenado para os três cenários simulados por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017

Figura 6-7 – Volume armazenado para os três cenários durante a crise de 2014 – 2015, simulados por Melo (2017)

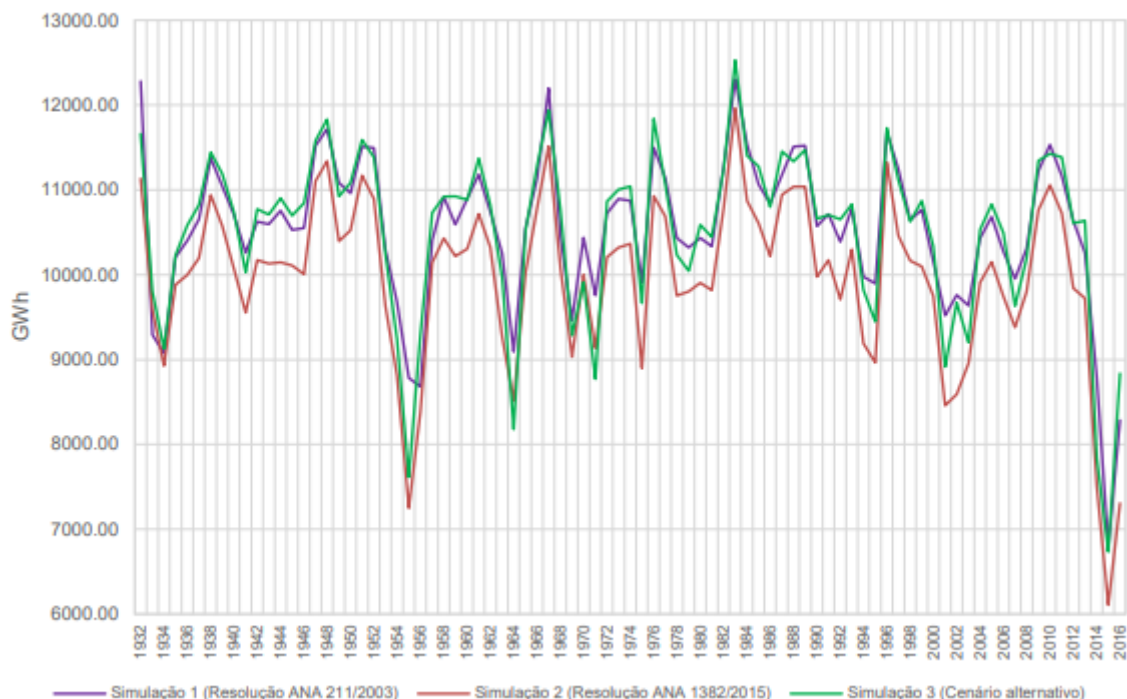


Fonte: Melo, 2017

A Figura 6-8 apresenta os resultados anuais de geração de energia, evidenciando que não houve diferença significativa entre os cenários. Entretanto, o cenário baseado nas condicionantes de operação estabelecidas pela Resolução nº 1.382/2015 apresentou uma geração constantemente inferior em relação aos demais. Também é possível verificar o impacto das duas crises hídricas (1951 – 1956 e 2013 – 2016) na geração de energia do sistema. A Figura 6-9 complementa essa análise ao apresentar os valores médios, mínimos e máximos dos três cenários. O Cenário de Operação Pós-Crise apresenta os três valores inferiores ao comparar com os outros cenários, o que já era esperado, uma vez que a Resolução de 2015 priorizou a segurança hídrica, com foco no uso para abastecimento.

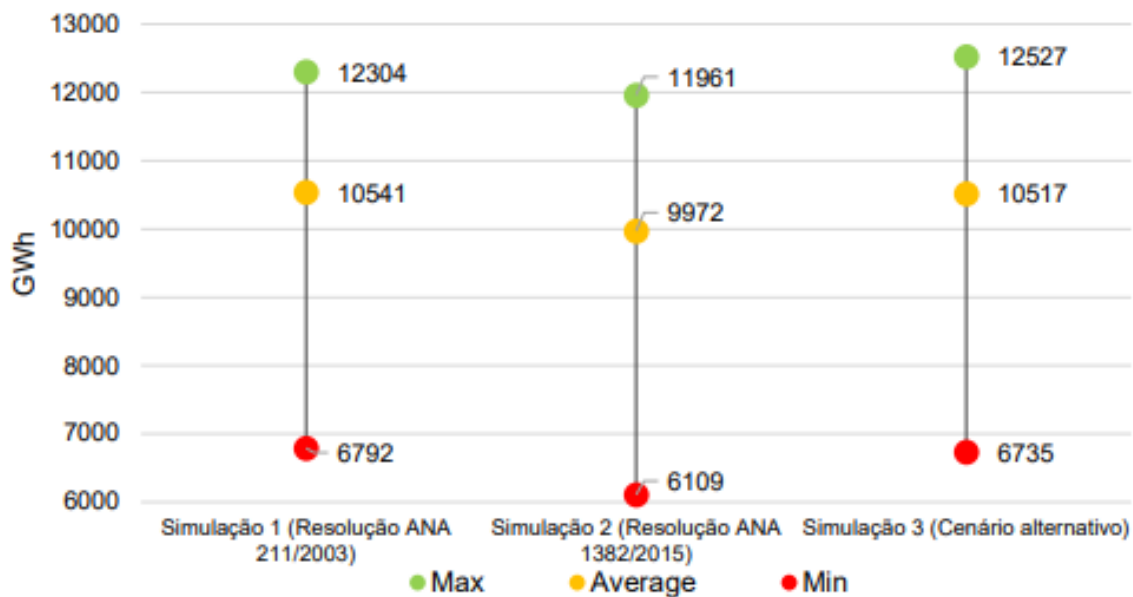
A Figura 6-10 mostra as curvas de permanência da vazão média mensal afluyente ao reservatório de Santa Cecília, considerando que 119 m³/s devem ser bombeados para Santana e 71 m³/s são liberados a jusante, totalizando 190 m³/s de vazão afluyente. Nota-se que apenas o Cenário de Referência não atingiu a meta de 190 m³/s de vazão em pelo menos 80% do tempo, enquanto o Cenário Alternativo oferece maior segurança de abastecimento para o Rio de Janeiro, cumprindo a meta em mais de 87% do tempo.

Figura 6-8 – Geração de energia anual, simulada por Melo (2017).



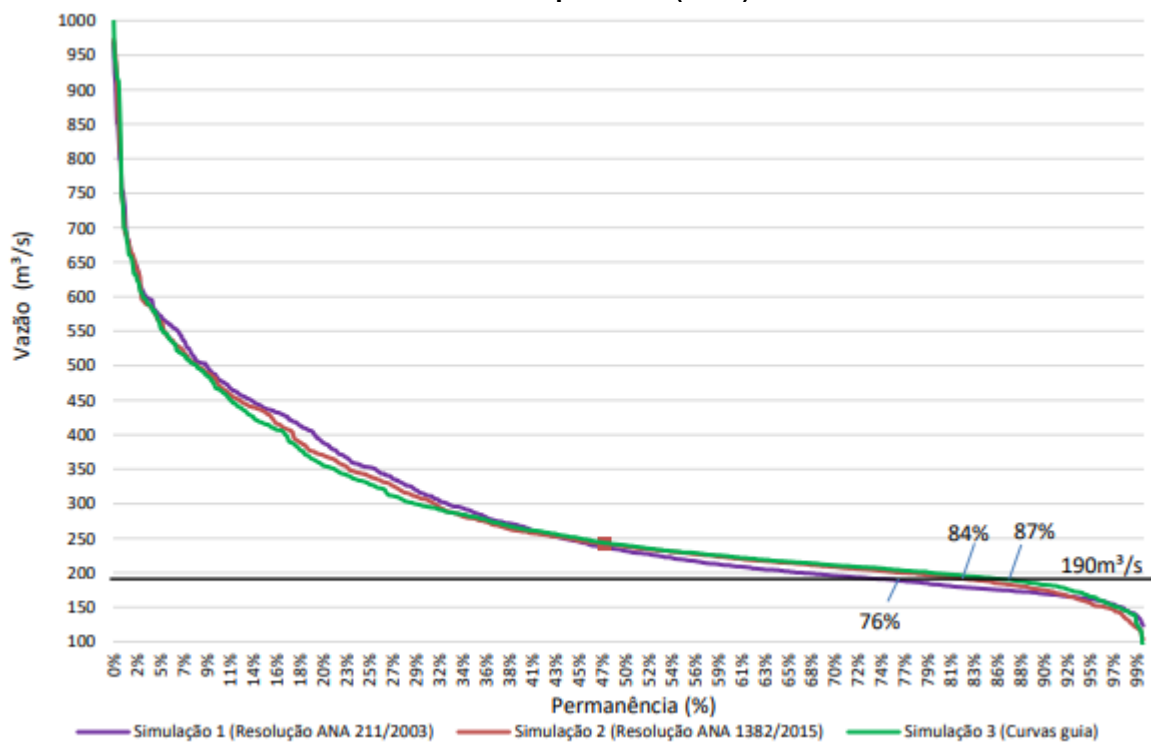
Fonte: Melo, 2017

Figura 6-9 – Comparação da geração de energia realizada por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017

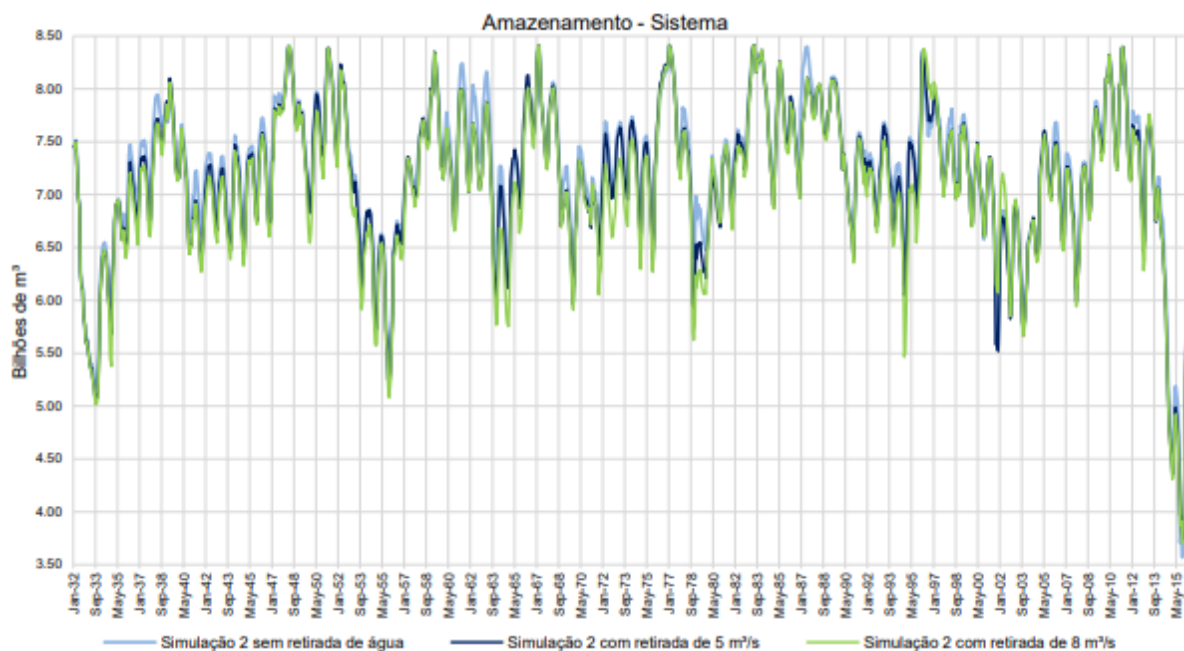
Figura 6-10 – Curvas de permanência de vazão média mensal afluyente em Santa Cecília, simulada por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017

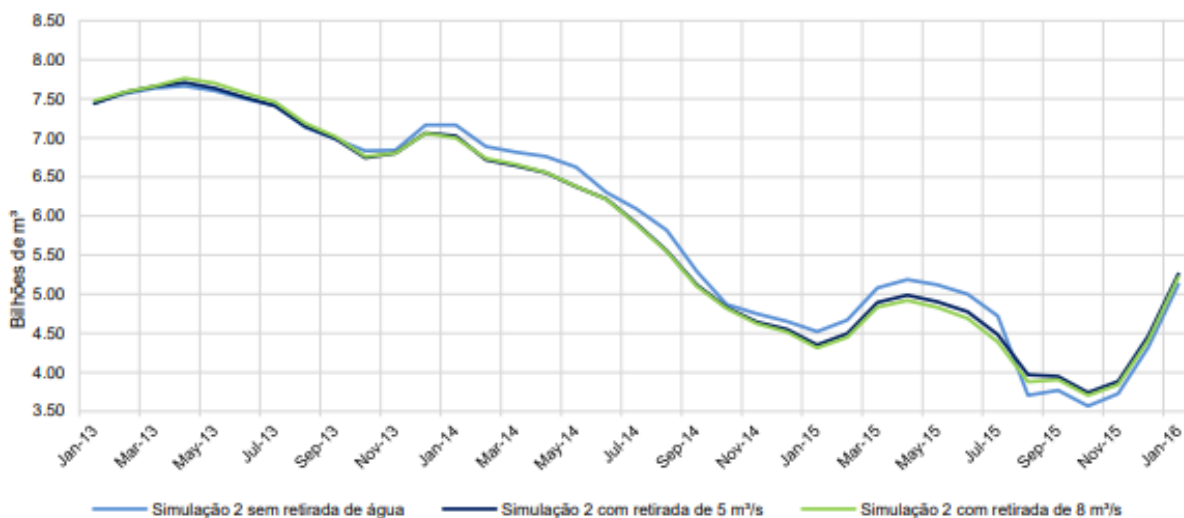
A Figura 6-11 apresenta os volumes para as simulações de retirada de água para a transposição até Atibainha e a Figura 6-12 detalha o volume durante a crise hídrica. Nota-se que os cenários com a retirada apresentaram menor volume armazenado ao longo de quase todo o período de simulação.

Figura 6-11 – Volume armazenado para os cenários de simulação da transposição para Atibainha, simulado por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017

Figura 6-12 – Volume armazenado para os cenários de simulação da transposição para Atibainha durante a crise hídrica, simulado por Melo (2017)

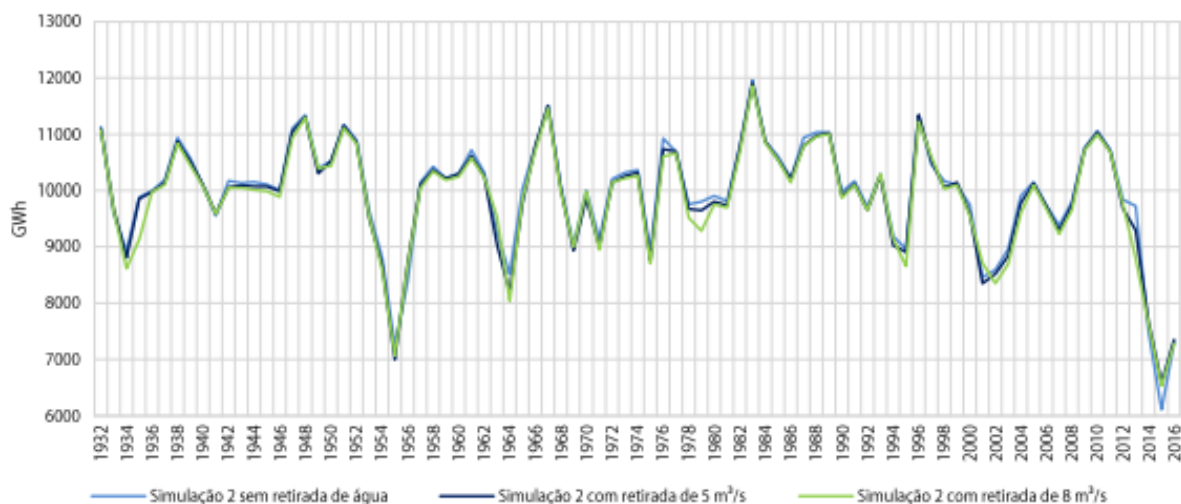


Fonte: Melo, 2017

Em relação à geração de energia, a Figura 6-13 mostra que a transposição Jaguari-Atibainha não implicava, com os valores de vazão derivados à época, em prejuízos significativos para a produção elétrica da bacia, uma vez que não foram observadas grandes diferenças entre os três cenários. Nesse sentido, vale lembrar que as análises foram realizadas com valores de vazões derivadas até 2016, não refletindo condições de vazões transpostas atualmente.

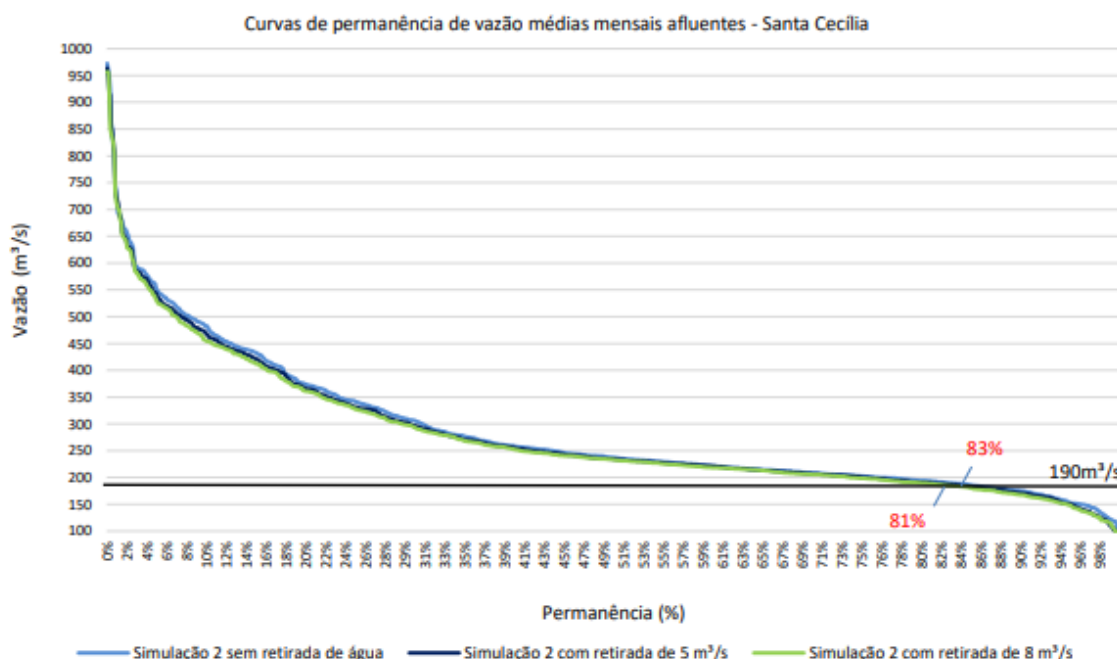
A Figura 6-14 apresenta a curva de permanência em Santa Cecília para os cenários de transposição Jaguari-Atibainha. É importante ressaltar que nas duas simulações, onde houve retirada de água (tanto no cenário de retirada de 5,13 m³/s como no de 8,5 m³/s), algumas demandas de municípios à montante da UHE Funil, ou seja, todos no estado de São Paulo não foram atendidas. O problema se mostrou maior com a retirada constante de 8,5 m³/s. Por outro lado, os três cenários cumprem com a meta de 190 m³/s de vazão afluente em mais de 80% do tempo, garantindo a segurança do abastecimento do Rio de Janeiro (pelo sistema Guandu).

Figura 6-13 – Geração de energia anual para as simulações com retirada de água para Atibainha, simulada por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017

Figura 6-14 – Curva de permanência em Santa Cecília para os cenários de transposição, simulada por Melo (2017)



Fonte: Melo, 2017

6.3. ESTUDO 3 - SEGURANÇA HÍDRICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL (PAIVA, 2020)

O estudo de Paiva (2020) utilizou o modelo hidrológico distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (MHD-INPE) para simular os impactos hidrológicos das mudanças climáticas (cenários RCP 4.5 e RCP 8.5) e de uso do solo (cenários otimista, atual e pessimista) sobre a bacia do rio Paraíba do Sul.

Para simular os cenários de uso do solo na porção paulista da bacia o estudo adotou o modelo *Dinamica EGO*, com base em mapas dos anos de 2005 e 2010 e em variáveis explicativas como infraestrutura, relevo e proximidade de áreas urbanas. Três cenários de uso do solo foram propostos: (i) atual, refletindo a continuidade das tendências observadas, com avanço da silvicultura e manutenção de áreas de vegetação; (ii) pessimista, com intensificação do desmatamento e substituição de áreas naturais por pastagens e monoculturas; e (iii) otimista, baseado na recuperação da vegetação nativa e aplicação de políticas ambientais. A projeção considerou os anos de 2025, 2035 e 2050, resultando em cenários que mostraram intensificação urbana ao longo de eixos logísticos como a Rodovia Dutra e áreas litorâneas.

A simulação no modelo hidrológico MHD-INPE desenvolvida por Paiva (2020) considerou o período histórico (1990-2015) e cenários futuros de mudança climática e uso do solo para os horizontes de 2016–2035 e 2036–2055. Para cada cenário, histórico e futuro propostos, o

estudo estimou as vazões de regularização de cada reservatório, usando as séries de vazões simuladas pelo modelo hidrológico considerando os usos consuntivos. Uma vez que o aumento de demanda de outros usos implica na redução da vazão de regularização, foi estimada a frequência (fração de tempo) em que segurança hídrica da bacia do rio Paraíba do Sul é comprometida, avaliando, o percentual de atendimento das vazões para as transposições para o sistema do Guandu e para o sistema Cantareira, bem como o percentual de atendimento das vazões mínimas estabelecidas pela Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015. Além de abastecer os municípios, os reservatórios estudados também são utilizados para geração de energia. Logo, vazões abaixo da mínima operativa não só acarretam desabastecimento hídrico das cidades, como também, falha no sistema elétrico.

As análises de segurança hídrica conduzidas por Paiva (2020) indicaram que a maioria dos cenários apontam que o reservatório de Jaguari conseguirá atender a transposição para o Sistema Cantareira e a sua produção de energia para todos os períodos simulados. Por Outro lado, todos os cenários concordam em que a transposição para o Sistema Guandu poderá ser comprometida em até 60% do tempo até meados do século. Todos os cenários mostraram uma redução na produção de energia das usinas hidrelétricas estudadas de 2016-2035 e uma tendência de melhora de 2036-2055.

6.4. ANÁLISE CRÍTICA DOS ESTUDOS SOBRE REGRAS OPERATIVAS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

A gestão dos reservatórios da bacia do rio Paraíba do Sul tem sido objeto de diversos estudos técnicos e acadêmicos que, ao longo do tempo, vem contribuindo para o aprimoramento das regras operativas e para o fortalecimento da segurança hídrica regional. Três trabalhos avaliados no presente estudo permitem observar a evolução metodológica e conceitual no tratamento do tema: Freitas (2003), Melo (2017) e Paiva (2020).

O estudo conduzido por Freitas, sob a coordenação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), teve como objetivo consolidar as condições de operação do sistema de reservatórios da bacia e das estruturas de transposição associadas. Para tanto, foi utilizado o modelo AcquaNet, baseado em rede de fluxo, que possibilitou simular alternativas de operação e embasar a edição da Resolução ANA nº 211/2003. O foco esteve na definição de limites de vazões defluentes, na ordem de deplecionamento dos principais reservatórios (Funil, Santa Branca, Paraibuna e Jaguari) e na regulação da transposição em

Santa Cecília. O estudo caracterizou-se por trabalhar com séries históricas longas, contemplando a variabilidade hidrológica do período de 1931 a 2002. Entretanto, restringiu-se a uma análise de caráter regulatório-operacional, sem incorporar explicitamente aspectos de crescimento de demanda ou cenários de mudanças climáticas.

Posteriormente, Melo (2017) desenvolveu uma avaliação acadêmica que buscou compreender os efeitos da crise hídrica de 2014–2015 na operação da bacia. A autora utilizou o modelo WEAP, de estrutura integrada, que permitiu incorporar de forma explícita as demandas municipais e setoriais. Foram comparados três esquemas de operação: (i) regras anteriores à crise hídrica, (ii) regras posteriores à Resolução Conjunta ANA nº 1.382/2015 e (iii) uma operação alternativa baseada em curvas-guia para os reservatórios. Adicionalmente, foi avaliada a hipótese da transposição Jaguari–Atibainha para reforço do Sistema Cantareira. O estudo apresentou avanços relevantes ao priorizar o abastecimento urbano como demanda de maior hierarquia. Contudo, trabalhou com demandas estáticas (referentes a 2010), não incorporando a dinâmica de crescimento populacional e setorial, e tampouco incluiu projeções climáticas. Ressalta-se que, apesar do modelo WEAP implementado por Melo (2017) contemplar a totalidade da bacia, a avaliação dos resultados restringiu-se principalmente ao Alto Paraíba do Sul e a pontos específicos de controle, como Santa Cecília, evidenciando a ausência de uma análise integrada da influência das regras operativas em toda a bacia.

Por sua vez, a tese de doutorado de Paiva (2020) ampliou a análise para o horizonte de longo prazo, incorporando de forma inovadora a perspectiva da segurança hídrica. O trabalho utilizou o MHD-INPE, permitindo a simulação espacialmente detalhada das vazões em toda a bacia. Foram integrados cenários de mudanças no uso e cobertura do solo (expansão urbana, agricultura e silvicultura), bem como projeções climáticas derivadas de modelos globais e regionais (RCP 4.5 e RCP 8.5), para os períodos de 2016–2035 e 2036–2055. Além disso, foram implementadas as regras vigentes da ANA e do ONS, incluindo a ordem de deplecionamento e as restrições operativas das transposições do sistema Guandu e Cantareira. O estudo concluiu que, embora os reservatórios consigam atender parte das demandas previstas, haverá comprometimento crescente da geração hidrelétrica e riscos de falhas na manutenção das vazões mínimas em cenários futuros. Essa abordagem amplia a visão tradicional, ao articular operação, clima, uso do solo e demandas de longo prazo. Apesar de avançar na avaliação de cenários futuros, o estudo de Paiva não se configura como um modelo hidrológico-operacional integrado. Essa limitação dificulta a representação conjunta das regras de operação dos reservatórios com a resposta hidrológica da bacia, comprometendo a aplicabilidade prática do modelo para suporte direto à gestão operacional.

De forma comparativa, nota-se uma clara evolução metodológica. O trabalho de Freitas forneceu a base legal e operacional para a gestão da bacia, estabelecendo as primeiras regras estruturadas com suporte de modelos de simulação. Melo avançou no sentido de avaliar alternativas em um contexto de crise, com destaque para a priorização do abastecimento humano e para a utilização de um modelo mais acessível e integrado aos processos decisórios dos comitês de bacia. Já Paiva expandiu o escopo para a análise de cenários futuros complexos, contemplando tanto a variabilidade climática quanto as mudanças de uso do solo, oferecendo um diagnóstico robusto da segurança hídrica em horizontes de médio e longo prazo.

Deve ser destacado que nenhum dos estudos analisados incorporou de forma explícita a variabilidade sazonal das vazões, o que limita a compreensão da influência das regras operativas em diferentes períodos hidrológicos ao longo do ano. Além disso, observa-se a ausência de uma abordagem verdadeiramente integrada que avalie os efeitos das regras de operação em toda a bacia, indo além da análise restrita a pontos de controle hidráulico específicos, como Santa Cecília. Soma-se a isso o fato de que o estudo de Paiva, apesar de seu avanço metodológico em cenários climáticos e de uso do solo, não se configura como uma modelagem operacional, o que dificulta a aplicação prática das regras de operação acopladas à hidrologia da bacia em escala sistêmica. Diante dessas limitações, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos futuros que integrem a sazonalidade das vazões, associem explicitamente as regras operacionais ao regime hidrológico e adotem uma perspectiva abrangente de toda a bacia, de modo a fornecer subsídios mais consistentes para a gestão adaptativa e para a tomada de decisão em tempo real.

7. DIRETRIZES PARA ESTUDOS SOBRE REGRAS OPERATIVAS NA BACIA

Neste capítulo serão apresentadas diretrizes técnicas para estudos representativos das regras operativas na bacia do rio Paraíba do Sul, envolvendo sugestões de modelos, cenários a serem simulados, assim como exemplos que possam ser utilizados como ponto de partida para elaboração de estudos futuros.

7.1. SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO PARA A RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015

Conforme já mencionado, a implementação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015 foi de extrema importância para garantir uma maior segurança ao Sistema Hidráulico da BHPS, através de seus mecanismos que otimizaram a reservação de água para os usos múltiplos e minimizaram a vulnerabilidade dos usuários de água da bacia em anos hidrológicos mais secos, como foi o caso do ano de 2021.

Cabe destacar que a resolução apresenta pontos que podem ser aprimorados. Um deles refere-se ao percentual de volume útil estabelecido para os estágios de deplecionamento do reservatório de Funil. Conforme indicado no Quadro 4-6, todos os três estágios possuem o mesmo limite mínimo de 30% do volume útil. Essa uniformidade reduz a flexibilidade operacional do sistema. Dessa forma, torna-se recomendável analisar a possibilidade de redução do limite do 3º estágio, medida que possibilitaria um controle de cheias mais eficiente durante o período chuvoso. Essa necessidade já foi apontada por Costa, Barcellos e Formiga Johnsson (2023).

Outro ponto que merece atenção é a possibilidade de se incluir uma margem de flexibilização nos limites de vazão praticados nos pontos de controle da bacia. Essa medida poderia ser implementada com a definição diferenciada das vazões mínimas a jusante ao longo do ano, reconhecendo as particularidades sazonais do regime hidrológico da bacia.

Os aprimoramentos propostos devem ser consolidados a partir de estudos mais detalhados sobre regras operativas, em consonância com as diretrizes apresentadas nos Itens a seguir.

7.2. ELABORAÇÃO DE MODELO OPERACIONAL DA BHPS

7.2.1. MODELOS SUGERIDOS

Para a elaboração do modelo operacional, devem ser utilizados softwares que possuam a capacidade de realizar simulações que contemplem a dinâmica existente entre os reservatórios da bacia, assim como possibilite a otimização da operação do sistema, permitindo a tomada de decisões embasada por dados concretos. Serão introduzidos 3 softwares distintos como sugestão: HEC-ResSim, *AcquaNet* e WEAP.

O HEC-ResSim (*Reservoir System Simulation*) é um modelo desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) voltado para a simulação da operação de sistemas de reservatórios. Permite a simulação de regras operativas definidas para diferentes reservatórios de um sistema, assim como para o todo, tendo por finalidade o apoio ao planejamento e a gestão operacional. O software possibilita avaliar o atendimento a objetivos distintos, tais como controle de cheias, abastecimento urbano, irrigação, geração hidrelétrica e manutenção de vazões ambientais, de forma integrada e considerando condições hidrológicas variáveis (USACE, 2007). Além disso, permite em conjunto com os diferentes cenários hidrológicos a aplicação de conjuntos de regras de operação, simulando as respostas dos reservatórios do sistema para diferentes situações. Dentre suas aplicações no Brasil, citam-se o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), no qual foi utilizado para simular cenários de operação em tempo real (no Eixo Leste do PISF, tendo sido simulados 13 reservatórios e 6 estações de bombeamento) e avaliar a eficiência de regras de alocação de água para usos múltiplos (CODEVASF; USACE, 2022), e o Plano de Controle de Cheias do Paraíba do Sul, utilizado para avaliar regras operativas de reservatórios frente a situações críticas (ANA, 2015).

O *AcquaNet* é um sistema de suporte à decisão (SSD) estruturado como modelo de rede de fluxo para análise de sistemas de recursos hídricos, permitindo representar extensas malhas com múltiplos reservatórios, derivações, demandas, trechos de rio e restrições. Em relação à operação de reservatórios, o *AcquaNet* permite explicitar curvas-meta, prioridades por uso e condicionantes (volumes mínimos, vazões ecológicas, limites de tomada d'água), além de testar políticas alternativas e medir indicadores de atendimento, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema, permitindo a avaliação do desempenho sob diferentes políticas operativas (LABSID, 2013). Dentre os estudos que aplicaram o software citam-se a revisão e atualização do Plano Diretor de Abastecimento e Água da Região Metropolitana de São Paulo (ENCIBRA, 2015) e, mais especificamente para a bacia do Paraíba do Sul, o estudo de Freitas

(2004) utilizou o *AcquaNet* para realizar a simulação das regras operativas da bacia, originando a Resolução nº 211/2003.

O WEAP (*Water Evaluation And Planning System*), desenvolvido pelo *Stockholm Environment Institute* (SEI, s.d), é um sistema de suporte à decisão que integra oferta, demanda, qualidade e aspectos ecossistêmicos para planejamento e operação de sistemas hídricos. Sua cenarização permite a comparação de diversas variáveis (regras operativas, ampliações, demandas, hidrologia e clima) em termos de atendimento, déficits, energia, custos e *trade-offs*. Para modelagem de reservatórios, o WEAP permite alocação de prioridades de atendimento e preferências de operação, respeitando prioridades e capacidades do sistema. Dentre suas aplicações, o estudo de Melo (2017) utilizou o *software* para simulação da operação na bacia do Paraíba do Sul nos períodos pré e pós crise hídrica, assim como em um cenário de operação alternativo utilizando curvas guias (item 6.1). Além disso, o modelo já foi exposto em reuniões do GTAOH, nas quais foram apresentadas suas aplicações no sistema hidráulico da bacia do Paraíba do Sul (CEIVAP, 2017).

Observa-se que existem diversos modelos capazes de representar a dinâmica operacional dos reservatórios existentes na bacia do Paraíba do Sul, cada qual com suas particularidades. Portanto, deve ser escolhido para os estudos futuros o modelo que possua boa relação custo-benefício na sua aplicação, permitindo a avaliação das regras operativas existentes e, caso possível, sua otimização.

7.2.2. DADOS DE ENTRADA NECESSÁRIOS

Para a execução de modelos que envolvam a operação de reservatórios, são necessários diferentes tipos de dados para sua elaboração. A seguir serão apresentados dados comumente utilizados nesse tipo de simulação, que devem ser adaptados ao modelo escolhido.

- Dados das estruturas:
 - Volumes armazenados, mínimos e máximos operativos, volumes de espera;
 - Níveis operativos;
 - Curvas cota-área-volume;
 - Vazões máximas de engolimento das turbinas das usinas hidrelétricas ou conjunto de bombas;
 - Características das demais estruturas hidráulicas (vertedouros, túneis, etc);
 - Demandas hídricas;
 - Evaporação líquida dos reservatórios;

- Vazões: naturais afluentes, mínimas e máximas defluentes; e
- Regras operativas.
- Dados dos trechos de propagação:
 - Características físicas (comprimento, declividade, largura);
 - Contribuições laterais; e
 - Demandas hídricas.

7.2.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO A PARTIR DE SIMULAÇÃO DAS REGRAS EXISTENTES

O modelo deverá ser calibrado e validado com base nas séries históricas de vazões afluentes e defluentes, assim como relativamente ao armazenamento dos reservatórios. Sugere-se a calibração do modelo em dois períodos distintos, condicionados por diferentes regras operacionais:

- Cenário de calibração 1 (2003 a 2015): com a aplicação da Resolução ANA nº 211/2003, representando as regras operativas anteriores à crise de 2014 – 2015;
- Cenário de calibração 2 (2015 a atualmente): com a aplicação da Resolução ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015, representando as regras operativas estabelecidas após a crise hídrica.

Essa etapa é essencial para avaliar a capacidade do modelo de recriar cada cenário observado com as regras operacionais de cada período. Dentre as formas de avaliar a qualidade do modelo em relação à realidade, cita-se a utilização de índices paramétricos como o coeficiente de determinação (R^2), o qual indica a qualidade do ajuste linear aos dados observados (sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste).

7.2.4. SIMULAÇÃO DAS REGRAS DA RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1382/2015

Sugere-se que seja feita uma avaliação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015, através de simulações que permitam determinar o grau de aumento da resiliência do Sistema caso a regra operacional estabelecida pela referida resolução já estivesse em vigor antes da crise de 2014 ocorrer. Essa análise permitirá estimar a eficiência da regra em situações de crise hídrica extrema.

7.3. PROPOSIÇÃO DE NOVOS CENÁRIOS DE REGRAS OPERACIONAIS

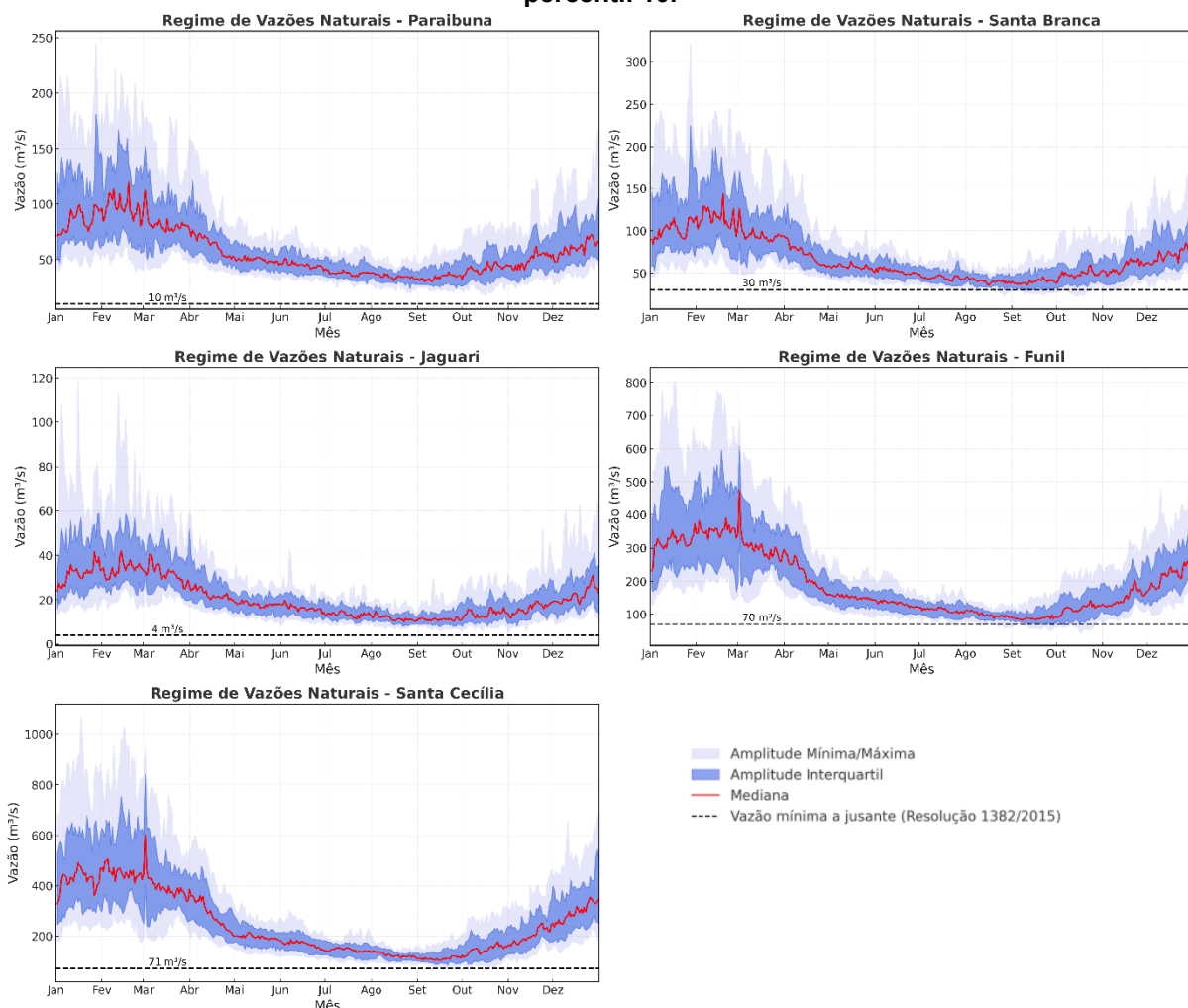
7.3.1. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS OPERACIONAIS ALTERNATIVOS

Nesta etapa deve-se utilizar o modelo operacional devidamente calibrado, capaz de incorporar todas as condicionantes que influenciam a dinâmica dos reservatórios — como transposições, usos consuntivos, legislações específicas e restrições operacionais. Devem ser apresentadas opções de regras operativas em faixas de operação vinculadas aos diferentes volumes úteis no reservatório equivalente do sistema. Para fins de avaliação, deve ser simulado o período histórico com a aplicação de tais regras operativas, o que irá permitir sua análise em comparação com um Cenário de Referência (por exemplo, os Cenários 1 e 2 definidos na etapa de calibração), possibilitando a verificação de melhorias no sistema com a regra alternativa.

O cenário de avaliação sugerido para alteração das regras tem como objetivo incorporar uma margem de flexibilização nos limites de vazão praticados nos pontos de controle da bacia. Essa medida pode ser implementada por meio da definição diferenciada das vazões mínimas a jusante ao longo do ano, de forma a refletir as particularidades sazonais do regime hidrológico. Nesse contexto, a regra de operação deve indicar a estratégia mais adequada em cada faixa e assegurando, na maior parte do tempo, o cumprimento das condicionantes estabelecidas.

No que se refere às defluências mínimas a jusante das UHEs, deve-se estabelecer uma vazão ecológica instantânea diferente para cada mês ou período (seco/chuvoso) do ano, com base na elaboração de um hidrograma ambiental que siga a tendência das bandas de desvio padrão das vazões naturais (conforme exemplificado na Figura 7-1). Como ponto de partida, sugere-se adotar a regra vigente durante a crise hídrica como referência para regimes extremamente secos, flexibilizando-a progressivamente à medida que as afluições aumentem ao longo do ano.

Figura 7-1 – Regime de vazão natural diário nos reservatórios do Sistema Paraíba do Sul, no período de 1993-2024. Amplitude máxima considerada como percentil 90 e mínima como percentil 10.



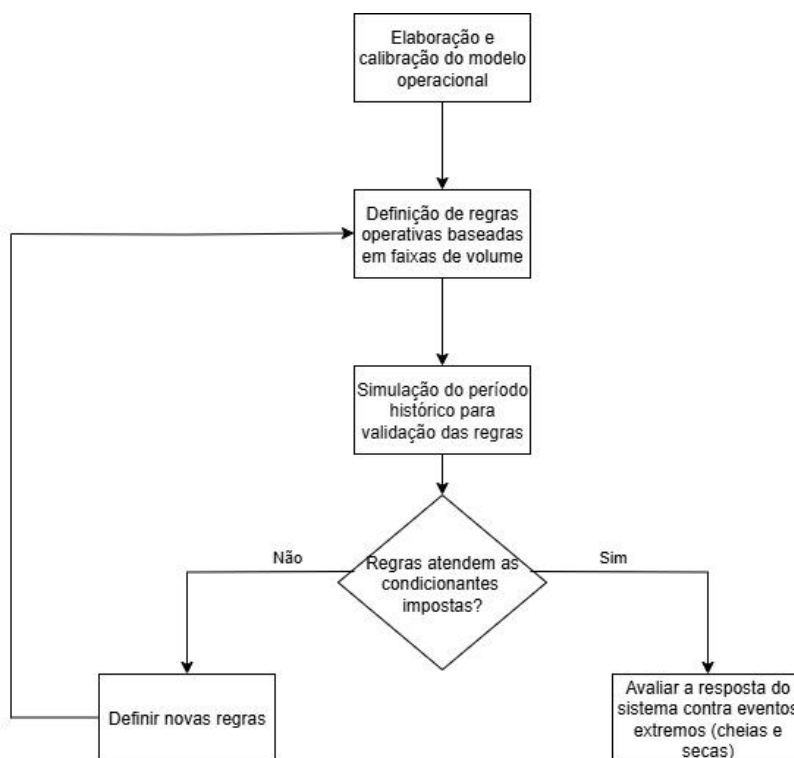
Fonte: elaborado pelo Consórcio

Devem, ainda, ser simulados regimes hidrológicos extremos observados na bacia, a fim de selecionar uma regra flexível, capaz de ampliar as defluências (criando volume de espera) em períodos de cheia (o que pode ser feito a partir da alteração do percentual de deplecionamento do volume dos reservatórios) e reforçar a reservação previamente a períodos de estiagem.

Em todos os cenários alternativos simulados, os resultados deverão ser avaliados de forma a identificar tanto a frequência de ocorrência de condições de possível vulnerabilidade, seja em escala local ou sistêmica, quanto os potenciais conflitos no atendimento das demandas dos diferentes setores usuários e das transposições para São Paulo e Rio de Janeiro. Além disso, os indicadores de volume útil armazenado no reservatório equivalente e de produção de energia deverão ser comparados com o Cenário de Referência, permitindo verificar eventuais ganhos ou perdas no armazenamento e na geração caso as regras propostas já estivessem

em vigor no passado. A Figura 7-2 apresenta o fluxograma para definição dos cenários operacionais.

Figura 7-2. Fluxograma para definição de regras operativas



Fonte: elaborado pelo Consórcio

7.3.2. CENARIZAÇÃO COM ALTERAÇÕES NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E DEMANDA

Para além do cenário atual, as mudanças climáticas possuem o potencial de afetar fatores intervenientes na definição de regras de operação que permitam a manutenção da segurança hídrica na bacia do Paraíba do Sul. Dentre tais fatores, a ANA publicou em 2024 o estudo “Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil” (ANA, 2024), no qual foi identificada uma tendência de redução de até 40% na disponibilidade hídrica na região Sudeste. Em uma análise específica na bacia, foi elaborado o estudo da Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas na Disponibilidade Hídrica e Vazões Máximas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (Profill, 2024), que identificou diminuições relativamente menores que os valores da ANA, porém ainda indicando potenciais de diminuição da disponibilidade. Ressalta-se que o estudo citado não incluiu a operação dos reservatórios de forma dinâmica, sendo consideradas apenas vazões médias substituídas.

Outro parâmetro diretamente afetado pelas mudanças climáticas são as demandas hídricas setoriais, que em grande parte possuem tendência de aumento. Conforme o Produto 06 elaborado no presente estudo, observa-se um aumento nas demandas do cenário de maior pressão 2045 de 6,58% relativo a mudanças climáticas e de 11,87% em cenários de mudanças climáticas com ondas de calor. Essas variações nos valores de disponibilidades e demandas irão afetar a dinâmica hidrológica na bacia, devendo ser incorporadas na elaboração de futuras regras operativas.

Dessa forma, sugere-se que seja considerado um cenário em que as mudanças climáticas alteram as vazões afluentes aos reservatórios, a fim de verificar se as regras operativas definidas nos cenários simulados (Item 7.3.1) manteriam o atendimento das condicionantes. Adicionalmente, o aumento da demanda de outros usos implica redução da vazão de regularização, o que permite estimar a frequência (fração de tempo) em que a segurança hídrica da bacia do rio Paraíba do Sul pode ser comprometida, podendo afetar também transposições para o sistema Guandu e para o sistema Cantareira. Assim como nos cenários anteriores, os resultados de volume útil armazenado nos reservatórios e produção de energia deverão ser apresentados neste cenário. A partir dessa abordagem, será possível quantificar o risco de não atendimento associado a cada regra operativa e subsidiar a escolha de estratégias mais robustas para a gestão integrada dos recursos hídricos.

7.4. REGRA DE OPERAÇÃO ACOPLADA À PREVISÃO DE VAZÃO SUB-SAZONAL E SAZONAL

A definição de uma regra operativa eficaz para reservatórios envolve múltiplas variáveis, como defluências mínimas, demandas hídricas e demais condicionantes legais e operacionais. Entre elas, destaca-se a vazão afluente, elemento que rege o comportamento do sistema e influencia diretamente os volumes armazenados. O conhecimento dessa variável é indispensável, sobretudo em um ecossistema interdependente como da bacia do Paraíba do Sul. Estudos como os de Torraca *et al.* (2021) e Quedi *et al.* (2024) demonstram que a integração entre previsão de vazões e modelos hidrológicos permite a concepção de resultados coerentes, resultados estes que podem trazer ganhos significativos à operação, aumentando a flexibilidade e otimizando o aproveitamento dos recursos hídricos. Também em linha com essa abordagem, a Nota Técnica NT-ONS DGL 0066/2022 (ONS, 2022) apresenta a utilização de previsão de vazões afluentes (obtidas a partir de modelos meteorológicos em conjunto ao modelo hidrológico SMAP/ONS) para a construção de cenários de armazenamento que subsidiam decisões operacionais.

Diante disso, sugere-se que, na BHPS, a regra de operação seja ajustada a partir de previsões de vazão sub-sazonais (até 45 dias) e sazonais (6 a 9 meses). A utilização de previsões climáticas em diferentes horizontes temporais permite diferenciar o tipo de decisão a ser tomada na operação de reservatórios. No horizonte sub-sazonal, com abrangência de até 45 dias, as previsões são particularmente úteis para decisões de caráter tático, tais como a definição de volumes-alvo semanais, a programação de defluências, a adoção de estratégias para a mitigação de cheias, além de ajustes operativos. Por sua vez, no horizonte sazonal, que se estende de 6 a 9 meses, as previsões fornecem subsídios para decisões de natureza estratégica, incluindo a revisão e adoção de curvas-guia sazonais, a definição de políticas de racionamento, a alocação de água entre diferentes usos, bem como o planejamento para o setor de energia.

Apesar da previsão de curto prazo (de dias até duas semanas) ser importante no que tange a minimização de impactos de inundação, sua aplicação é restrita ao tratar de períodos secos (já que conservar volume nos reservatórios neste curto período pode não ser o suficiente para lidar com uma crise hídrica extensa). Por outro lado, a previsão sub-sazonal permite maior tempo de resposta e execução de manobras no sistema, principalmente se for considerada como uma confirmação de uma previsão de longo prazo passada.

Assim, as faixas de operação deverão ser ajustadas conforme os cenários de previsão de vazões, explicitados a seguir. A primeira etapa do processo é a previsão meteorológica (*forecast*), normalmente obtida a partir da combinação de múltiplos modelos climáticos (*ensembles*). Sua confiabilidade é maior nos horizontes de curto prazo, diminuindo à medida que o horizonte aumenta, em função da variabilidade e complexidade das variáveis atmosféricas, como a não linearidade da interação oceano-atmosfera. Por isso, previsões de médio prazo são expressas em formato probabilístico, resultando em múltiplos cenários provenientes dos conjuntos de modelos climáticos. Tendo em vista essas incertezas, recomenda-se sempre considerar cenários favoráveis e desfavoráveis de precipitação, de modo a maximizar o grau de confiança dos resultados e possibilitar uma avaliação adequada dos riscos de cheias e de escassez. Para os cenários de estiagem extrema, podem ser traçadas curvas de recessão de vazões, que permitem estimar o declínio da vazão de um rio em períodos sem chuvas, indicando as vazões mínimas esperadas naquele curso d'água. Com sua utilização, possibilita-se a previsão das afluições futuras (e, por consequência, volumes) dos reservatórios em períodos sem precipitação, de forma a melhor orientar a tomada de decisões.

Associada a essa previsão meteorológica, a aplicação de um modelo hidrológico (chuva-vazão), bem como um modelo operacional, calibrado para as bacias de interesse, garante a adequada representação das dinâmicas do sistema. O uso combinado desses instrumentos possibilitará a simulação de cenários vindouros com a previsão das vazões e, por consequência, dos volumes úteis dos reservatórios, permitindo a análise da aplicabilidade de diferentes regras operativas, apoiando a escolha das faixas de operação mais adequadas perante as previsões e assegurando a integridade do sistema. Essa abordagem integrada permitirá transformar previsões hidrológicas em decisões operacionais antecipadas, orientando a adoção de estratégias mais ou menos restritivas conforme as condições projetadas. Com isso, cria-se uma base técnica robusta para políticas de gestão, otimizando a alocação dos recursos na bacia e fortalecendo a segurança hídrica da bacia.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise histórica e normativa da operação do Sistema Hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul evidencia a evolução contínua das regras operativas em resposta a crises hídricas, pressões socioeconômicas e à necessidade de conciliar múltiplos usos da água. Desde os primeiros marcos legais na década de 1970, passando pelas crises de 2001–2003 e 2014–2016, até a consolidação da Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382/2015, verifica-se um processo de aperfeiçoamento regulatório pautado pela busca de maior segurança hídrica.

As séries históricas de vazões e volumes armazenados mostram que o Sistema apresenta capacidade de regularização importante, mas ainda sujeito a vulnerabilidades frente a estiagens prolongadas. A Resolução nº 1382/2015 representou um marco ao introduzir a reserva estratégica no reservatório de Paraibuna, redefinir limites de deplecionamento e vazões mínimas a jusante dos reservatórios, bem como fortalecer a governança por meio do GAOPS. Tais medidas ampliaram a resiliência do sistema, embora tenham implicado em redução na produção hidrelétrica, evidenciando o *trade-off* entre segurança hídrica e geração de energia. Relativamente aos volumes úteis dos reservatórios, somente o do Funil apresentou incremento em tal parâmetro após a Resolução. Porém, há de se levar em conta que o período pós-resolução também apresentou vazões naturais menores que o anterior. Portanto, para avaliar os efeitos da Resolução em sua totalidade, devem ser realizados estudos e simulações de regras operativas que permitam comparar quantitativamente os resultados com os dados observados, permitindo a identificação de possíveis otimizações no sistema.

Também foram avaliados estudos anteriores sobre regras operativas da BHPS, sendo eles os estudos de Freitas (2003), Melo (2017) e Paiva (2020). A análise comparativa dos três estudos evidencia avanços significativos na compreensão e na gestão dos reservatórios da Bacia do Rio Paraíba do Sul, desde a consolidação normativa inicial até a incorporação de cenários climáticos e de uso do solo em horizontes futuros. Entretanto, persistem lacunas relevantes, como a ausência de uma representação sazonal das vazões, a limitação de análises a pontos específicos em detrimento de uma abordagem verdadeiramente integrada de toda a bacia e a carência de modelos que conciliem de forma operacional a dinâmica hidrológica com as regras de gestão. Nesse contexto, recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas que articulem a modelagem hidrológica-operacional com cenários de variabilidade climática e crescimento da demanda, permitindo ampliar a robustez das regras operativas e oferecer

suporte mais efetivo à tomada de decisão em tempo real, em consonância com os princípios da segurança hídrica e da gestão adaptativa.

Dentre as diretrizes propostas para estudos futuros sobre regras operativas destacam-se:

- Adotar modelos operacionais (como *AcquaNet*, WEAP ou HEC-ResSim) como ferramenta indispensável para simular cenários alternativos, quantificar riscos e apoiar decisões de gestão;
- Aprofundar, a partir da simulação com o modelo operacional do Sistema, a flexibilização das regras operativas, especialmente quanto às vazões mínimas e percentuais de deplecionamento;
- Avançar na definição de vazões ecológicas sazonais, de modo a refletir a variabilidade natural da bacia;
- Avaliar regras de operação sob diferentes cenários de mudanças climáticas e pressões de demanda;
- Integrar previsões sub-sazonais e sazonais de vazão às estratégias operacionais, fortalecendo a antecipação de eventos críticos.

Por fim, destaca-se que a gestão do Sistema Hidráulico do rio Paraíba do Sul deve manter seu caráter adaptativo e participativo, conciliando os múltiplos usos da água em um contexto de crescente incerteza hidrológica. O fortalecimento da governança, aliado à aplicação de modelos preditivos e à atualização contínua das regras operativas, constitui caminho estratégico para assegurar a resiliência do sistema e a segurança hídrica das populações e setores econômicos que dele dependem.

9. REFERÊNCIAS

AGEVAP - Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Nota Técnica nº 30/2014/SAG-ANA. Solicita apoio no sentido de que seja elaborado estudo para avaliação dos mecanismos e valores da cobrança de transposição da água da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul, para a Bacia do rio Guandu., 25 Julho 2014. Disponível em: <https://www.agevap.org.br/downloads/nt-30.2014-sag-ana.pdf>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Plano de Ações Complementares para a Gestão da Crise Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul. Resende: AGEVAP, jun. 2015. Disponível em: <https://www.agevap.org.br/gtaoh/pac-ana-jun15.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Resolução nº 1.931, de 12 de dezembro de 2017. Dispõe sobre as condições de operação dos reservatórios Jaguari e Atibainha, integrantes do Sistema Cantareira, e estabelece regras para a transposição de águas entre as bacias do rio Paraíba do Sul e do rio Piracicaba. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 dez. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2017/1931>. Acesso em: 18 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Resolução nº 925, de 28 de março de 2017. Dispõe sobre as condições de operação dos reservatórios equivalentes das Bacias do rio Paraíba do Sul e do rio Guandu, a serem aplicadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 29 mar. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2017/925>. Acesso em: 18 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Medição – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SAR0). Brasília, DF: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>. Acesso em: 18 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 2024. 72 p. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf. Acesso em: 17 ago. 2025.

BRASIL. Resolução ANA nº 211, de 26 de maio de 2003. Dispõe sobre as regras de operação do sistema hidráulico do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2003/Resolucao-ANA-211.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução ANA nº 465, de 20 de setembro de 2004. Dispõe sobre as condições de operação do sistema hidráulico do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2004/Resolucao-ANA-465.pdf><http://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2003/Resolucao-ANA-211.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução ANA nº 706, de 21 de dezembro de 2004. Aprova o Manual Operativo do Programa de Trabalho do Contrato de Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2004/Resolucao-ANA-706.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução ANA nº 003, de 22 de janeiro de 2007. Constitui a Comissão de Avaliação do Contrato de Gestão celebrado entre a ANA e a AGEVAP. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2007/Resolucao-ANA-003.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução ANA nº 37, de 25 de fevereiro de 2008. Constitui a Comissão de Avaliação do Contrato de Gestão celebrado entre a ANA e a AGEVAP. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2008/Resolucao-ANA-037.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382, de 07 de dezembro de 2015. Dispõe sobre as condições de operação a serem observadas para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/resolucoes/ana/2015/1382-2015.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução ANA nº 1.931, de 30 de outubro de 2017. Estabelece condições de operação para o sistema hidráulico do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2017/Resolucao-ANA-1931.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 127, de 26 de julho de 2022. Estabelece as condições e procedimentos a serem observados pelos titulares de empreendimentos hidrelétricos com potência instalada superior a 1.000 kW para a instalação e operação de estações hidrológicas. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2022/Resolucao-ANA-127.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Decreto nº 68.324, de 9 de março de 1971. Aprova o plano de regularização do rio Paraíba e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 10 mar. 1971.

Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-68324-9-marco-1971-409944-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 18 ago. 2025.

BRASIL. Decreto nº 81.436, de 9 de março de 1978. Altera a redação dos artigos 3º e 7º do Decreto n. 68.324, de 9 de março de 1971, que aprova o plano de regularização do rio Paraíba do Sul e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 10 mar. 1978. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-81436-9-marco-1978-430467-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 18 ago. 2025.

CAMPOS MAGAZINE NEWS. Baixa vazão do Rio Paraíba gera alerta. 15 ago. 2019. Disponível em: <https://www.camposmagazinenews.com.br/2019/08/baixa-vazao-do-rio-paraiba-gera-alerta.html>. Acesso em: 18 ago. 2025.

CARVALHO, Giordano Bruno Bomtempo de; THOMAS, Patrick Thadeu; GONTIJO JÚNIOR, Wilde Cardoso. Cobrança pelo uso de recursos hídricos na transposição da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul para a bacia hidrográfica do rio Guandu. Disponível em: <https://comiteguandu.org.br/downloads/ARTIGOS%20E%20OUTROS/COBRANCA%20PELO%20USO%20DE%20RECURSOS%20HIDRICOS%20NA%20TRANSPOSICAO%20D%20A%20BACIA%20HIDROGRAFICA%20DO%20RIO%20PARAIBA%20DO%20SUL%20PARA%20A%20BACIA%20HIDROGRAFICA%20DO%20RIO%20GUANDU.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. *Boletim Pelas Águas do Paraíba*, ano 18, edição 32 (mai./jun./jul. 2017). Resende, RJ: CEIVAP/AGEVAP, 2017. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/boletim/boletim32.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.

COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS – CEDAE. Sistema Guandu. Rio de Janeiro: CEDAE, [s.d.]. Disponível em: https://www.cedae.com.br/portals/0/livreto_guandu.pdf. Acesso em: 19 ago. 2025.

CODEVASF; USACE. *PISF-HEC-ResSim Model: CODEVASF – USACE*. Documento técnico apresentado na Reunião Técnica de Acompanhamento do PISF. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/pisf/reunioes-tecnicas-de-acompanhamento/2022/maio/arquivos/pisf-hec-ressim-model-codevasf-usace.pdf/view>. Acesso em: 01 ago. 2025.

COMITÊ GUANDU. Disponibilidade Hídrica. Apresentação realizada no CTEP em 3 jul. 2014. Comitê Guandu, 2014. Disponível em: <https://comiteguandu.org.br/conteudo/apresentacao-disponibilidade-hidrica-jose-governo-ctep-3-7-2014.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

COSTA, Larissa Ferreira da; BARCELLOS, Izabela Andrade; FORMIGA-JOHNSSON, Rosa Maria. Evolução do armazenamento equivalente do Sistema Hidráulico Paraíba do Sul após novas regras operativas (Dez/2016 a Jun/23) e implicações sobre a segurança hídrica dos seus usuários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25. Aracaju, 2023.

COSTA, Larissa Ferreira da; FARIAS JUNIOR, José Edson Falcão de; JOHNSSON, Rosa Maria Formiga; ACSELRAD, Moema Versiani. Enfrentando a estiagem da Bacia do Rio Paraíba do Sul. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS XXI., 2015, Brasília. Anais. Porto Alegre: ABRHidro, 2015. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP020935.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

ENCIBRA. Revisão e Atualização do Plano Diretor de Abastecimento de Água da RMSP – Relatório Parcial RP-02 (preliminar). São Paulo: SABESP/ENCIBRA, 2015. Disponível em: https://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/9226/pdaa_rmSP_rp-02-parte-do-preliminar.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

FREITAS, Marcos Airton de Sousa. Regras de operação dos reservatórios da bacia do rio Paraíba do Sul / Sistema Guandu, 2004.

LABSID – Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (Poli-USP). *Manual AcquaNet 2013*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Deptº de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2013. 72 p. Acesso em: 11 ago. 2025

LIGHT ENERGIA. Complexo Hidrelétrico de Lajes. Rio de Janeiro: Light, 2023. Disponível em: <https://www.light.com.br/SitePages/page-blog-postagem.aspx?postId=28>. Acesso em: 18 ago. 2025.

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. Contribuições da LIGHT Serviços de Eletricidade S.A. – Audiência Pública nº 004/2005. Brasília: ANEEL, 21 mar. 2005. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/audiencias-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=9180&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReun

iao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp. Acesso em: 19 ago. 2025.

MELO, Monique de Barros. Avaliação de operações alternativas para a gestão de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul. 2017. 38 f. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS (S.d). Portal de Dados Abertos. Rio de Janeiro: ONS, S.d. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Manual de Procedimentos da Operação – Módulo 5 – Submódulo 5.11: Cadastro de Informações Operacionais Hidráulicas da Bacia do rio Paraíba do Sul. Código CD-OR.AE.PBS, Revisão 14. 2025.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Apresentação na 92ª Reunião do GAOPS, 19 nov. 2024. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/eventos-criticos/apresentacoes-das-reunioes/92a-reuniao-gaops-19-11-2024-apresentacao-ons.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

PAIVA, A. C. (2020). *Segurança Hídrica da bacia do rio Paraíba do Sul* [Tese de Doutorado, INPE].

PROFILL ENGENHARIA E AMBIENTE S.A. (2024). Contratação de empresa especializada para realização do estudo das disponibilidades hídricas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba Do Sul (EDH-PS). Produto 5 – Mudanças Climáticas. Relatório Técnico. Cód. do Documento: AGVP_PARAIBA_EHID_Produto5_MudancasClimaticas_R02

QUEDI, Erik; FAN, Fernando; SIQUEIRA, Vinicius; COLLISCHONN, Walter; PAIVA, Rodrigo; PETRY, Ingrid; GAMA, Cléber; SILVEIRA, Reinaldo; PARANHOS, Cassia; FREITAS, Camila. Sub-seasonal streamflow forecasts for hydropower dams in the Brazilian Electrical Interconnected System. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 29, e7, 2024. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230109> Acesso em: 03 set. 2025.

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE (SEI). *WEAP: Water Evaluation And Planning System*. S.d. Disponível em: <https://www.weap21.org/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SPAGUAS. Agência de Águas do Estado de São Paulo. Portaria do DAEE autoriza Sabesp a captar água no reservatório do Jaguari. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: <https://www.spaguas.sp.gov.br/site/portaria-do-daee-autoriza-sabesp-a-captar-agua-no-reservatorio-do-jaguari/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Apresentação ao Grupo de Trabalho de Alocação de Água da Bacia do Rio Paraíba do Sul (GTAOH). AGEVAP, 2018. Disponível em: <https://www.agevap.org.br/gtaoh/apresentacao-sabesp-01-2018-gtaoh.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

TORRACA, H. B.; ROSSI, C. L. C. U.; TORMAM, M. F.; MATTOS, F. I.; YAMAMOTO, L. T.; DURRA, A. P. K.; CAMARGO JÚNIOR, H.; ROCHA, M. J. D. & DA SILVA, S. B. (2021). Avaliação de metodologia de previsão de vazões em horizonte sub sazonal utilizando a previsão estendida do modelo ECMWF. Anais XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.