



VARIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA COM O USO MÚLTIPLO DA ÁGUA NO RIO PARAÍBA DO SUL

Lucia Saraiva Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas
Antonio Ferreira da Hora

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

VARIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA COM O USO
MÚLTIPLO DA ÁGUA NO RIO PARAÍBA DO SUL

Lucia Saraiva Dias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, D.Sc.

Prof. Antonio Ferreira da Hora, D.Sc.

Prof. Marco Aurélio dos Santos, D.Sc.

Dr. Daniel de Berrêdo Vianna, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Dias, Lucia Saraiva

Varição da Geração de Energia Hidrelétrica com o Uso Múltiplo da Água no Rio Paraíba do Sul / Lucia Saraiva Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIV, 72 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas

Antonio Ferreira da Hora

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 50-53.

1.Energia hidráulica. 2. Uso múltiplo da água. 3. Gestão de recursos hídricos. I. Freitas, Marcos Aurélio Vasconcelos de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

*“Se a educação sozinha não
transforma a sociedade, sem ela
tampouco a sociedade muda.”*

(Paulo Freire)

Agradecimentos

Quero agradecer primeiramente a Deus pela saúde, energia e capacitação que me proporcionou ter ao longo desses últimos anos. Sou abençoada por cada amigo que fiz, pelas experiências que passei e por cada pessoa que encontrei durante o mestrado. No entanto, neste momento, preciso fazer alguns destaques.

Ao meu pai, Marcilio Dias Silva, e minha mãe, Eliana Saraiva Lião, vocês ganharam na loteria quando me tiveram (kkk)! Amo vocês!

Ao meu avô, Francisco Saraiva Lião que sempre tive como amigo e exemplo de inteligência, inclusive emocional, esse mestrado é seu também.

Ao meu irmão, Francisco Saraiva Dias, que mesmo não querendo preparava os lanches para mim enquanto eu estava “louca” estudando para as provas e trabalhos. Obrigada mano!

Meus orientadores, Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas e Antonio Ferreira da Hora, que sempre se demonstraram disponíveis para tirar qualquer dúvida e fornecer orientação. Eu admiro a bagagem de trabalho e conhecimento que cada um possui.

À professora, Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora, autora do SisUCA e minha professora de longa data (acho que deve fazer 6 anos), nem o total de páginas dessa dissertação seria suficiente para lhe agradecer. Mas muito obrigada pela ajuda com a elaboração da dissertação e também pelas mensagens e telefonemas trocados, até as broncas para me recolocar de volta no eixo do trabalho eu preciso ser grata, porque elas fizeram efeito. Espero que essa dissertação seja apenas um início de aprendizado para eu estar muito melhor como profissional e como pessoa e você fez parte dessa estruturação inicial. Você tem a minha admiração!

Não poderia esquecer também dos amigos que fiz no PPE. A Amanda, minha gêmea de aniversário, foi muito bom pegar carona com você durante 1 ano, espero que a nossa amizade ultrapasse o mestrado. Gardenio, você foi a paciência em pessoa, fizemos todas as matérias juntos sem combinar, obrigada pelas conversas e por adiantar informações de trabalho que a turma toda iria precisar (kkk). Lucas, menino do interior, obrigada pelas risadas e conversas também. À turma do mestrado 2017, se alguém não falou para vocês que são maravilhosos, eu digo! Porque eu pude ver, bem como participar de uma turma unida que sempre tinha um ajudando o outro, sem exceção.

Aos professores do PPE pela qualidade de conhecimento e ensino. Ao Paulo e a Sandrinha, que da secretaria, resolviam qualquer burocracia. Também não posso deixar de elogiar a disponibilização de um banheiro limpo e arrumado mais o café grátis na secretaria a disposição dos alunos, vocês salvaram a aula de muitos contra o sono.

Obrigada a agência do Cnpq pela bolsa durante o curso para a cobertura de despesas e gastos essenciais a continuidade dos estudos.

Fico feliz também de ter participado de projetos no IVIG, que me propiciou um bom trabalho em equipe. A minha coordenadora de projeto Vânia Sanches que permitia a adaptação do tempo de trabalho de projeto com o tempo para a elaboração da dissertação. A Vânia Sanches juntamente com o Breno e Cynara muito obrigada pelas conversas e pelos chás compartilhados.

Por fim, outras duas pessoas do IVIG que quero agradecer é ao Gorge pelas caronas no meu segundo ano de mestrado e a Bruninha pelo apoio que sempre me deu nos trabalhos, sempre se prontificando a me ajudar e aconselhar.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VARIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA COM O USO MÚLTIPLO DA ÁGUA NO RIO PARAÍBA DO SUL

Lucia Saraiva Dias

Fevereiro/2019

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas

Antonio Ferreira da Hora

Programa: Planejamento Energético

Essa dissertação avalia a variação da geração de energia hidrelétrica com o uso múltiplo da água, a partir da execução do software SisUCA no rio Paraíba do Sul através do conjunto de usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização: Paraibuna, Santa Branca, Jaguari (Rio Jaguari) e Funil. Neste estudo, verificou-se que pontos específicos do rio possuem dificuldades no atendimento da demanda hídrica como é o caso do município de Jacareí, que engloba a UHE Jaguari (SP), e que outorgas concedidas necessitam serem revistas pela Agência Nacional de Água (ANA). Um contraponto deste trabalho, foi a presença de incrementais negativos na série de vazões afluentes, além do fato das séries de vazões afluentes e naturais se encontrarem subdimensionadas, por isso sugere-se que as mesmas sejam novamente dimensionadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

VARIATION OF HYDROELECTRIC ENERGY GENERATION WITH THE
WATER MULTIPLE USE IN THE PARAÍBA DO SUL RIVER

Lucia Saraiva Dias

February/2019

Advisors: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas
Antonio Ferreira da Hora

Department: Energy Planning

This dissertation evaluates the variation of hydropower generation with the water multiple use, from the execution of the SisUCA software in the Paraíba do Sul river through the set of hydroelectric plants with regularization reservoirs: Paraibuna, Santa Branca, Jaguari (Rio Jaguari) and Funnel. In this study, it was verified that specific points of the river have difficulties in meeting the water demand, as is the case of the municipality of Jacareí, which encompasses the Jaguari (São Paulo), and that granted grants need to be reviewed by the National Water Agency. A counterpoint to this work was the presence of negative incrementals in the series of affluent flows, in addition to the fact that the series of affluent and natural flows were undersized, so it is suggested that they be resized by the National Electric System Operator.

Sumário

| | | |
|-----------------|---|----|
| I. | INTRODUÇÃO | 1 |
| I.1. | MOTIVAÇÃO, ESCOLHA E RELEVÂNCIA DO TEMA | 1 |
| I.2. | OBJETIVO GERAL | 2 |
| I.2.1. | Objetivos específicos | 2 |
| I.3. | ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO | 3 |
| II. | MODELOS DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA | 4 |
| II.1. | METODOLOGIA DO MODELO ADOTADO PARA A COMPATIBILIZAÇÃO DOS USOS DOS RECURSOS HÍDRICOS¹ | 6 |
| III. | CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO EM ESTUDO | 12 |
| III.1. | PANORAMA DOS USOS MÚLTIPLOS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL | 14 |
| III.1.1. | Usos múltiplos | 15 |
| III.1.2. | Geração de energia | 17 |
| III.2. | CARACTERIZAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS | 20 |
| III.2.1. | Usina Hidrelétrica de Paraibuna | 20 |
| III.2.2. | Usina Hidrelétrica de Santa Branca | 21 |
| III.2.3. | Usina Hidrelétrica de Jaguari | 22 |
| III.2.4. | Usina Hidrelétrica de Funil | 22 |
| III.3. | O MOSAICO INSTITUCIONAL DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL | 25 |
| IV. | USO DO SOFTWARE SISUCA | 28 |
| IV.1. | ANÁLISE DE CONTINUIDADE DAS VAZÕES | 29 |
| IV.2. | VALIDAÇÃO DO USO DO SOFTWARE | 32 |
| IV.3. | LEVANTAMENTO E CONSISTÊNCIA DE DADOS | 35 |
| V. | RESULTADOS | 37 |
| VI. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 46 |
| VII. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |
| VIII. | ANEXOS | 54 |

| | |
|---|-----------|
| VIII.1. MANUAL DE USO DO SOFTWARE SisUCA..... | 54 |
| VIII.2. VAZÃO NATURAL | 59 |
| VIII.3. GRÁFICO VAZÃO NATURAL X VAZÃO AFLUENTE | 61 |
| VIII.4. ANÁLISE DE CONTINUIDADE DE VAZÃO | 66 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul | 12 |
| Figura 2: Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul. | 19 |
| Figura 3: Usina Hidrelétrica de Paraibuna vista do alto | 21 |
| Figura 4: Usina Hidrelétrica de Santa Branca vista do alto | 21 |
| Figura 5: Usina Hidrelétrica de Jaguari vista do alto | 22 |
| Figura 6: Usina Hidrelétrica de Funil | 23 |
| Figura 7: Divisão dos organismos de sub-bacia da Bacia do Rio Paraíba do Sul. | 26 |
| Figura 8: Topologia de 4 empreendimentos hidrelétricos no Rio Paraíba do Sul | 29 |
| Figura 9: Topologia das Usinas Hidrelétricas Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil presentes na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. | 31 |
| Figura 10: Layout inicial do software SisUCA | 54 |
| Figura 11: SisUCA – Preenchimento de dados de cada usina hidrelétrica..... | 55 |
| Figura 12: Visualização das vazões naturais no software SisUCA | 55 |
| Figura 13: Tela para salvar os dados resultantes da simulação do software | 56 |
| Figura 14: Vazão afluente das usinas Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil (1999-2010) | 58 |
| Figura 15: Energia gerada das usinas Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil (1999-2010) | 58 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Demanda dos usos múltiplos consuntivos na bacia do rio Paraíba do Sul. | 16 |
| Tabela 2: Características dos Aproveitamentos Hidrelétricos | 24 |
| Tabela 3: Curvas características dos Aproveitamentos Hidrelétricos | 24 |
| Tabela 4: Geração de energia para as Usinas Hidrelétricas de Paraibuna e Santa Branca, considerando a operação do ONS, Engehidro e SisUCA..... | 33 |
| Tabela 5: Geração de energia para as Usinas Hidrelétricas de Jaguari e Funil, considerando a operação do ONS, Engehidro e SisUCA..... | 34 |
| Tabela 6: Diferença percentual da geração de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul considerando a operação do ONS, Engehidro e SisUCA..... | 34 |
| Tabela 7: Q _{95%} mensal e VMO para as usinas hidrelétricas de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil, no rio Paraíba do Sul, no período de 1993 a 2001..... | 36 |
| Tabela 8: Q _{95%} mensal e VMO para as usinas hidrelétricas de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil, no rio Paraíba do Sul, no período de 1999 a 2010..... | 36 |
| Tabela 9: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Paraibuna e UHE Santa Branca no período de 1993 a 2001 .. | 37 |
| Tabela 10: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Jaguari e UHE Funil no período de 1993 a 2001 | 38 |
| Tabela 11: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1993 a 2001 | 38 |
| Tabela 12: Percentual da demanda hídrica dos usos consuntivos, próximos aos empreendimentos hidrelétricos, em relação a Vazão Máxima Outorgável (VMO) no período de 1993 a 2001 | 40 |
| Tabela 13: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Paraibuna e UHE Santa Branca no período de 1999 a 2010 .. | 41 |
| Tabela 14: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Jaguari e UHE Funil no período de 1999 a 2010 | 41 |

| | |
|---|----|
| Tabela 15: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1999 a 2010 | 42 |
| Tabela 16: Percentual da demanda hídrica dos usos consuntivos, próximos aos empreendimentos hidrelétricos, em relação a Vazão Máxima Outorgável (VMO) no período de 1999 a 2010 | 44 |
| Tabela 17: Layout do resultado de simulação de dados sem usos consuntivos para a usina hidrelétrica de Paraibuna | 56 |
| Tabela 18: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Paraibuna. | 59 |
| Tabela 19: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Santa Branca | 59 |
| Tabela 20: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Jaguari..... | 60 |
| Tabela 21: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Funil..... | 60 |
| Tabela 22: Resultados dos cálculos referente a análise de continuidade..... | 66 |

Lista de Gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 1: Cenários de produção e redução percentual de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1993 a 2001 | 39 |
| Gráfico 2: Cenários de geração de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1993 a 2001 | 39 |
| Gráfico 3: Cenários de produção e redução percentual de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1999 a 2010 | 42 |
| Gráfico 4: Cenários de geração de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1999 a 2010..... | 43 |
| Gráfico 5: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Paraibuna (2000-2004) | 62 |
| Gráfico 6: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Paraibuna (2005-2010) | 62 |
| Gráfico 7: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Santa Branca (2000-2004) | 63 |
| Gráfico 8: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Santa Branca (2005-2010) | 63 |
| Gráfico 9: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Jaguari (2000-2004) | 64 |
| Gráfico 10: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Jaguari (2005-2010) | 64 |
| Gráfico 11: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Funil (2000-2004) | 65 |
| Gráfico 12: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Funil (2005-2010) | 65 |

CAPÍTULO I

I. INTRODUÇÃO

A água possui múltiplos usos como irrigação, navegação, abastecimento humano e industrial e geração de energia, que necessitam serem compatibilizados. Por isso, a Lei Federal nº 9433/97, que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos, especifica que o uso prioritário da água, em situação de escassez, é o abastecimento humano e a dessedentação de animais. (BRASIL, 1997).

Desta forma, gestores, agências governamentais e também os usuários de recursos hídricos deparam-se frequentemente com a questão de manter o fluxo mínimo de água necessário ao equilíbrio do ecossistema aquático de uma bacia hidrográfica, ao mesmo tempo em que é preciso reservar ou alocar água para atender aos seus diversos usos, requeridos pelos diferentes setores da economia e usuários ali instalados (DURÕES, 2015).

No que concerne a geração de energia, retiradas significativas de água a montante dos reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos reduzem as vazões afluentes, diminuindo a disponibilidade hídrica para jusante e a produção da usina. Assim, o gestor de recursos hídricos deve compatibilizar os usos de modo a garantir as demandas por água e a produção de eletricidade (HORA, 2012).

Com base no exposto, buscou-se avaliar a questão da compatibilização do uso da água e da geração hidráulica de energia. Para isso, será utilizada a ferramenta gratuita e pública de modelagem computacional Sistema de Simulação de Usinas com Usos Consuntivos da Água (SisUCA), desenvolvida por Hora (2012), para simular os aproveitamentos hidrelétricos, com reservatórios de regularização, existentes no estirão do rio Paraíba do Sul, onde estão concentradas quatro usinas hidrelétricas: Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil. Este sistema juntamente com a transposição do Complexo Light, em síntese, é responsável pelo abastecimento de água da região metropolitana do Rio de Janeiro, que em números representa 12 milhões de pessoas (IBGE, 2018).

I.1. MOTIVAÇÃO, ESCOLHA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A diversificação do uso da água e o conseqüente aumento da demanda fizeram surgir o problema de demandas conflitantes (LIMA, 2007). Estes conflitos podem ser:

conflitos de destinação de uso e conflitos de disponibilidades quantitativas e/ou qualitativas. (LANNA, 2008). Por isso, é importante se evitar fatores que provoquem o desperdício e a deterioração dos recursos hídricos como o que ocorre em más operações de reservatórios de água. A falta de um planejamento adequado para a construção dos reservatórios dificulta o uso otimizado dos volumes acumulados. (LIMA, 2007).

Numa tentativa de solução, o governo federal através da Lei nº 9.648, de 27/05/1998, autorizou a reestruturação da Eletrobrás e de suas subsidiárias e estabeleceu a figura do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, com a missão de otimizar a operação do sistema eletro-energético e minimizar os custos daí decorrentes, atuando de forma independente dos interesses comerciais dos agentes (HORA, 2012).

O ONS opera de forma a atender a demanda energética do Sistema Interligado Nacional (SIN), no entanto, este trabalho permeará uma metodologia diferente com foco na priorização dos usos múltiplos da água. Para tanto, será adotado o software SisUCA - Sistema de Simulação de Usinas com Usos Consuntivos de Água, ferramenta computacional livre desenvolvida por HORA (2012). Cabe destacar que o SisUCA foi originalmente desenvolvido e aplicado com sucesso na bacia do rio Tocantins, cuja área de drenagem é de, aproximadamente, 800.000 km². Também foi utilizado para a bacia do rio Piabanha, com área de drenagem de cerca de 2.000 km² e não apresentou limitações nas simulações dos aproveitamentos hidrelétricos existentes em ambas bacias (CHIAPPORI, 2015).

A escolha do rio Paraíba do Sul deve-se ao fato de que, ao longo do seu estirão, são identificados usos múltiplos da água, principalmente para a geração de energia. Conta também com a presença de reservatórios de regularização para garantir armazenamento e atuar no controle de cheias e na regulação de vazão. Este também possui um sistema de transposição de água. (LIGHT, 2017).

I.2. OBJETIVO GERAL

Analisar a variação da geração de energia hidrelétrica com os demais usos consuntivos da água, aplicando o software SisUCA no rio Paraíba do Sul com as usinas hidrelétricas de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil, que funcionam com reservatórios de regularização.

I.2.1. Objetivos específicos

- a) Definir cenários de simulação do conjunto de aproveitamentos hidrelétricos de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil no rio Paraíba do Sul.
- b) Avaliar a continuidade das séries de vazões médias mensais nos locais dos aproveitamentos hidrelétricos.
- c) Avaliar o SisUCA como ferramenta para apoio na gestão eficiente dos recursos hídricos no estirão do rio Paraíba do Sul das nascentes até a UHE Funil.

I.3. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1, trata da introdução ao tema através da apresentação dos objetivos, justificativa e motivação para seleção do assunto.

O capítulo 2 será dedicado a descrição da metodologia que subsidiou a simulação da operação hidráulica e energética do conjunto de aproveitamentos hidrelétricos Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil localizados no rio Paraíba do Sul.

O capítulo 3 descreve a região de estudo bem como as usinas hidrelétricas utilizadas nas simulações.

O capítulo 4 contempla a coleta de dados, a sua consistência e a análise de continuidade das vazões e descreve a ferramenta computacional SISUCA.

O capítulo 5 apresenta os resultados das simulações dos cenários de operação hidráulico e energética.

O capítulo 6 descreve as conclusões e recomendações sobre a pesquisa desenvolvida, bem como os possíveis desdobramentos para estudos futuros.

As publicações consultadas para o desenvolvimento da pesquisa estão relacionadas nas referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

II. MODELOS DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

No Brasil, o modelo de simulação energética mais conhecido é o Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas (MSUI) da Eletrobrás, que é um software que simula a operação detalhada do sistema hidrelétrico (ELETROBRAS, 2017). O MSUI opera cada reservatório e cada usina segundo suas características particulares, visando maximizar a eficiência, evitar qualquer desperdício e distribuir a reserva de água de forma a otimizar a sua utilização e a produção de energia. Então o MSUI visa o atendimento da demanda de energia focando na eficiência da geração e não da compatibilização dos usos múltiplos da água. Ele não é um software livre e o usuário tem que assinar um contrato de uso anual do módulo executável da ferramenta, sendo vedada a exploração, a divulgação ou a reprodução total ou parcial do programa, sob qualquer forma ou modo (ELETROBRAS, 2017).

Além do MSUI, existe o NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo, cujo objetivo é, de acordo com CEPEL (2017), determinar, a cada mês, metas de geração para cada usina do sistema hidrotérmico que atendam à demanda e minimizem o valor esperado do custo de operação ao longo do período de planejamento. Esse custo é composto pelo custo variável de combustível das usinas termelétricas e pelo custo atribuído às interrupções de fornecimento de energia, representado por uma função de penalização dos déficits de energia (CEPEL, 2017). Este modelo foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), não é livre e seu uso está condicionado à assinatura de contrato de uso, tal como o MSUI. Cabe destacar que o modelo não considera usinas individualizadas e sim o parque hidrotérmico.

Por último, existe o modelo SUIHI (Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas para Sistemas Hidrotérmicos Interligados), desenvolvido pelo CEPEL, de médio e longo prazo para a simulação da operação energética de sistemas hidrotérmicos interligados, que utiliza a representação das usinas hidrelétricas e térmicas de forma individualizada. O SUIHI simula com a mesma política de operação definida pelo modelo NEWAVE, representada pelas funções de custo futuro de cada mês, tendo como objetivo a individualização pelas usinas hidrelétricas das metas de geração obtidas

para o reservatório equivalente (CPAMP, 2016). Portanto, o modelo visa a minimização dos custos de operação, não é um software livre e seu uso está condicionado à contrato de uso, tal como o MSUI.

No âmbito internacional, STOLL et al. (2017) mencionam que, no mundo, as simulações hidroenergéticas são baseadas em: 1) modelos de curto prazo, que analisam a confiabilidade da rede; 2) modelos de custo de produção, que enfocam os aspectos operacionais do setor de energia e sua capacidade de fornecer eletricidade a todas as demandas, e, 3) modelos de expansão de capacidade que consideram o futuro do setor para fins de planejamento.

BRANCHE (2017) menciona o conceito SHARE (Sustainability approach for all users, Higher efficiency and equity among sectors, Adaptability for all solutions, River basin perspectives for all, Engaging all stakeholders). Este conceito é recente e foi aplicado em apenas 12 estudos de caso no mundo, cada um com as suas especificidades: 2 na América Latina (Peru e Costa Rica), 2 nos Estados Unidos, 2 na Europa (França), 2 na África (Camarões e Nigéria), 2 na Ásia (Nepal-Índia e China) e 2 na Oceania (Austrália).

No conceito SHARE a operacionalização de um conjunto de reservatórios de energia hidrelétrica deve compartilhar recursos, responsabilidades, direitos e riscos, custos e benefícios para que a articulação entre os interessados seja proveitosa, igualitária e sustentável. De modo que, o princípio de compartilhamento respeite os termos técnicos e a dinâmica social, ambiental e econômica inerentes aos locais de aplicação.

De forma orientativa, o conceito possui cinco acrônimos:

- i) abordagem de sustentabilidade para todos os usuários, onde avalia-se o grau de sustentabilidade dos reservatórios, considerando suas fases de construção, operação, gerenciamento e governança, a partir de 20 (vinte) tópicos relacionados a área de meio ambiente, social, econômica, técnico financeira e questões transversais como direitos humanos;
- ii) maior eficiência e equidade entre os setores, que tenta avaliar o valor econômico de todos os serviços e benefícios oferecidos pela implantação do reservatório de regularização, estimulando que benefícios de reservatórios de energia hidrelétrica a longo prazo sejam incluídos na análise financeira do empreendimento.

- iii) adaptabilidade para todas as soluções, que visa proporcionar maior flexibilidade e adaptabilidade na forma como a água é alocada entre os usuários durante toda a vida útil do reservatório.
- iv) perspectivas da bacia hidrográfica para todos, visa o gerenciamento integrado de recursos hídricos, evitando que projetos hidrelétricos sejam avaliados isoladamente de uma estrutura geral de planejamento.
- v) envolvimento de todas as partes interessadas, envolve a identificação e as perspectivas de todas as partes interessadas que possam influenciar ou ser impactadas por decisões sobre os reservatórios, pois os diferentes pontos de vista irão gerar prioridades alternativas e diferentes desafios entre as partes interessadas.

Cabe lembrar que os estudos não trataram do desenvolvimento de uma ferramenta computacional e sim da aplicação de um conceito, portanto cada caso foi tratado de forma individual e cada um resultou em uma solução individual.

II.1.METODOLOGIA DO MODELO ADOTADO PARA A COMPATIBILIZAÇÃO DOS USOS DOS RECURSOS HÍDRICOS¹

HORA (2012) elaborou uma nova metodologia para subsidiar a operação hidráulico-energética, a partir da compatibilização dos usos múltiplos dos recursos hídricos. A autora desenvolveu a ferramenta computacional SisUCA e verificou sua aplicabilidade para a bacia dos rios Tocantins e Araguaia, que possui expressiva área de drenagem, de cerca de 800 mil km².

A metodologia proposta adota a formulação matemática desenvolvida pelo Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – MSUI. Entretanto, o objetivo é o enfoque nos recursos hídricos e na sua disponibilização para todos os usos, incluindo o setor elétrico.

Desta forma, como inovação na formulação existente, a autora buscou introduzir uma nova variável representada por retiradas de água, limitada à totalidade do valor da vazão máxima outorgável (VMO). Esta vazão, conforme preconizado na Lei nº 9.433/97, é a máxima permitida para o uso e adotada pelos órgãos públicos gestores de recursos hídricos no cálculo das disponibilidades hídricas para controle e emissão de outorgas.

¹Extraído e adaptado de HORA (2012).

Porém, no que tange a operação, a usina hidrelétrica continuará sendo representada pela equação do balanço hídrico (1):

$$\Delta Vi = [Qaflui - Qturbi - Qverti - Qevapi] . ns \quad (1)$$

Onde,

ΔVi : variação do volume da usina i, em m³.

$Qaflui$: vazão afluyente à usina i, em m³/s.

$Qturbi$: vazão turbinada na usina i, em m³/s.

$Qverti$: vazão vertida na usina i, em m³/s.

$Qevapi$: vazão evaporada no reservatório da usina i, em m³/s.

ns : números de segundos de um mês médio, igual a 2,6298x10⁶.

A vazão afluyente contabiliza cenários de retiradas de água a montante de cada aproveitamento de uma cascata, permitindo ao usuário avaliar a evolução das possíveis perdas de geração de energia em função do incremento dos usos consuntivos, limitados ao valor da vazão máxima outorgável. Assim, a vazão afluyente a uma usina será expressa por (3):

$$Qaflu_i = Qincr_i + \sum_{k \in M} Qdef_k - Qusos \quad (2)$$

$$Qaflu_i = [Qnat_i - \sum_{k \in M} Qnat_k] + \sum_{k \in M} [Qturb_k + Qvert_k] - Qusos \quad (3)$$

$$Qusos \leq VMO$$

Onde,

$Qaflu_i$: vazão afluyente à usina i, em m³/s.

$Qincr_i$: vazão natural incremental no trecho entre a usina i e a(s) usina(s) de montante, em m³/s.

Representa a vazão natural da usina i descontada da vazão natural da usina de montante k.

$Qdef$: vazão defluente das usinas de montante, em m³/s.

Representa a soma das vazões turbinada e vertida na usina de montante k.

Q_{usos}: vazão retirada no trecho entre as usinas i e k, em m³/s.

Representa os usos consuntivos, limitados à vazão máxima outorgável (VMO), no trecho entre as usinas.

VMO: vazão máxima outorgável, em m³/s, e adotada como sendo 70% da Q95%

M conjunto das usinas imediatamente a montante da usina i.

A equação da produção mensal de energia (4) da usina é :

$$E_i = 0,00981 \cdot \eta_i \cdot h_i \cdot Q_{\text{turb}_i} \cdot n_h \quad (4)$$

Onde,

E_i: produção média mensal de energia da usina i, em MWmês.

h_i: queda líquida da usina i, em m.

Q_{turb_i}: vazão turbinada no mês na usina i, em m³/s.

η_i: rendimento do conjunto turbina-gerador da usina i.

n_h: números de horas de um mês médio (30 dias e 10h) é igual a 730h.

Na operação do setor elétrico, a produção de energia, ou ainda, o turbinamento das vazões afluentes deve buscar atender a demanda do mercado consumidor, ao custo de geração e, se possível, à ordem de prioridade da operação de esvaziamento e reenchimento da cascata. Contudo, tendo em vista o enfoque da compatibilização do uso da água com a geração de energia, buscou-se dar preferência à disponibilidade hídrica para jusante dos aproveitamentos, através de uma nova regra de operação para o turbinamento, que passará a ser definido em dois patamares nas seguintes condições de contorno:

- Nível d'água do reservatório no mês anterior entre o mínimo normal e o máximo normal: nesta condição o reservatório estará em fase de enchimento ou deplecionamento, então a vazão turbinada será igual a vazão regularizada

- Nível d'água do reservatório no mês anterior entre o máximo normal e o máximo maxíorum: nesta condição o reservatório encontra-se cheio, então a vazão turbinada será igual a vazão máxima turbinável.

A vazão regularizada foi definida como sendo a maior vazão turbinada de forma constante, ao longo do período de simulação, durante a condição de enchimento ou deplecionamento do reservatório. Portanto, ela representa a média das vazões afluentes do período em que o reservatório estava totalmente cheio (100%), passou pelo instante em que ficou vazio (0%), e tornou a ficar cheio novamente (100%), sem reenchimentos totais intermediários, utilizando, neste intervalo de tempo, todo o volume útil do reservatório (compreendido entre o nível d'água máximo normal e o nível d'água mínimo normal).

A vazão regularizada foi calculada por processo iterativo em que se buscou igualar os lados da Equação (5), a seguir:

$$\sum_t^{t1} (Q_{aflu} - Q_{reg} = \Delta V_{máx} + |\Delta V_{mín}|) \quad (5)$$

$$\Delta V_{máx} + |\Delta V_{mín}| = \Delta V_{útil} \quad (6)$$

Onde,

Q_{aflu} : vazão afluente, em m³/s.

Q_{reg} : vazão regularizada, em m³/s.

$\Delta V_{máx}$, $|\Delta V_{mín}|$: máxima e mínima diferença acumulada entre as vazões afluente e regularizada, em m³/s.

$\Delta V_{útil}$: volume útil do reservatório, compreendido entre o nível d'água máximo normal e o nível d'água mínimo normal, em m³/s. Este pode ser expresso por:

$$V_{util_{i,t}} = V_{util_{i,t-1}} + (Q_{aflu_{i,t}} \cdot ns) - (Q_{turb_{i,t}} \cdot ns) - V_{evap_{i,t}} \quad (7)$$

No qual,

$V_{util_{i,t}}$: volume útil da usina i no mês t, em m³.

$V_{util_{i,t-1}}$: volume útil da usina i no mês anterior, t-1, em m³.

$Q_{aflu_{i,t}}$: vazão afluente à usina i no mês t, em m³/s.

$Q_{turb_{i,t}}$: vazão turbinada na usina i no mês t, em m³/s.

$V_{evap_{i,t}}$: volume evaporado na usina i no mês t, em m³.

Com base no exposto, a simulação do turbinamento de uma usina i com reservatório de regularização deverá observar as seguintes regras ((8), (9)):

$$Qturb_i = Qreg_i \rightarrow NAmín_{normal} \leq NAreserv < NAmáx_{normal} \quad (8)$$

$$Qturb_i = Qturb_{máx_i} \rightarrow se NAreserv = NAmáx_{normal} \quad (9)$$

Onde,

$Qturb_{máx_i}$: vazão máxima de turbinamento ou vazão máxima de engolimento, em m^3/s . Normalmente é oferecido pelo concessionário, porém também pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$Qturb_{máx_i} = \frac{PI_i \cdot 1000}{9,81 \cdot \eta_i \cdot h_{ref_i}} \quad (10)$$

No qual,

PI_i : potência instalada na usina i , em MW.

h_{ref_i} : queda de referência da usina i , em m.

η_i : rendimento do conjunto turbina-gerador-transformador

Quanto a vazão de evaporação da Equação (1), esta pode ser calculada pela fórmula matemática da Equação (11).

$$Vevap_{i,t} = E_{i,t} \cdot A \cdot 1000 \quad (11)$$

Onde,

A : área do espelho d'água, em km^2 .

$E_{i,t}$: evaporação no mês t da usina i , em mm.

$Vevap_{i,t}$: volume evaporado na usina i no mês t , em m^3 .

No entanto, o valor da área do espelho d'água (A) que parece desconhecido pode ser obtido através da curva cota x área e do conhecimento do nível de água do reservatório (12).

$$N.A_{res,t} = N.A.médio_{res,t-1} = \left(\frac{N.A_{rest,t-2} + N.A_{rest,t-1}}{2} \right) \quad (12)$$

Onde,

$N.A_{res,t}$: nível d'água do reservatório da usina i no início do mês t, em m.

$N.A_{rest,t-2}$: nível d'água do reservatório de regularização da usina i no mês t-2, em m.

$N.A_{rest,t-1}$: nível d'água do reservatório de regularização da usina i no mês t-1, em m.

CAPÍTULO 3

III. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO EM ESTUDO

Localizada entre as coordenadas 21°30'20" latitude sul e 41°04'12,21" longitude oeste e 22°19'32,45" latitude sul e 41°43'26,10" longitude oeste e com uma área de drenagem de 62.074 km², a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (Figura 1) abrange 69% da área do Estado do Rio de Janeiro, 5% do Estado de São Paulo e 4% do Estado de Minas Gerais, compreendendo um total de 184 municípios, onde 88 são em Minas Gerais, 57 no Rio de Janeiro e 39 em São Paulo (AGEVAP, 2011).

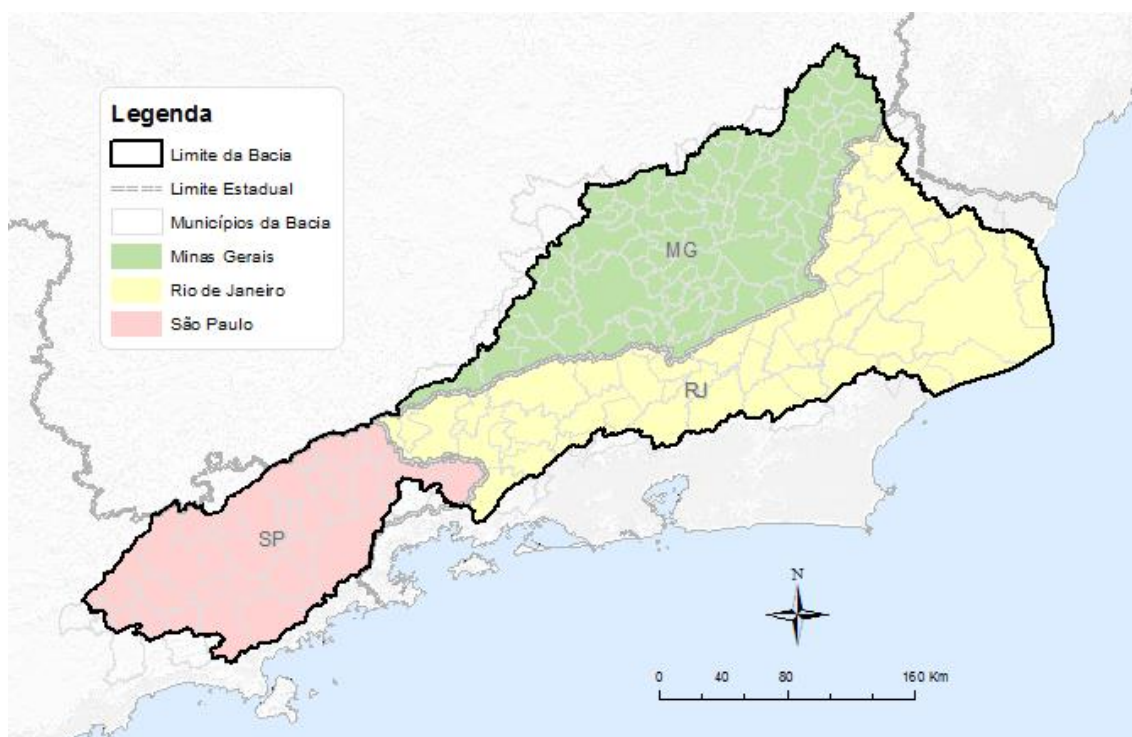


Figura 1: Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Fonte: CEIVAP, 2018

Com 1.150 quilômetros o rio Paraíba do Sul nasce da confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna no norte do Estado de São Paulo, tendo a sua foz no norte do Estado do Rio de Janeiro, na praia de Atafona, no município de São João da Barra. As vazões médias, considerando as séries históricas temporais, nos principais trechos da bacia são, aproximadamente: trecho nascente, 150m³/s; trecho médio, 280m³/s; e trecho jusante, 810m³/s (CEIVAP, 2010).

A bacia hidrográfica faz parte do bioma da Mata Atlântica e a vegetação característica da região deu lugar primeiramente ao cultivo de cana de açúcar e café para posteriormente ser ocupada pela formação/expansão de cidades e a industrialização (CEIVAP, 2010; NUNES, 2015).

Com características de clima tropical, sua temperatura média anual oscila entre 18°C e 32°C e apresenta um regime de chuvas com períodos definidos, sendo seco pelos meses de junho a setembro e chuvoso nos meses de novembro a janeiro. (ANA, 2002).

De relevo acidentado e com poucas áreas planas, a bacia enfrenta um quadro generalizado de processos de erosão em diferentes estágios de avanço ao longo do seu território, sendo que 43% das terras apresentam média vulnerabilidade a erosão e 20% apresentam alta (AGEVAP, 2007). A escassez de florestas e o uso inadequado do solo em áreas naturalmente suscetíveis a erosão como encostas, margens de rios, nascentes e topos de morro podem ser colocados como os principais causadores de erosão, porém não são os únicos, a atividade mineral com a extração de areia e argila também contribuem para desestabilização do solo. Os sedimentos desprendidos do solo são carreados para as calhas dos rios, tornando a água turva e dificultando a manutenção da drenagem existente a jusante dos rios. No que se diz respeito a camada superficial do solo, durante a erosão essa camada é retirada, prejudicando a agricultura, pois perde-se o estrato de solo fértil. Em terrenos de alta vulnerabilidade a erosão, há ocorrência de ravinas e voçorocas de grandes dimensões (AGEVAP, 2007; ANA, 2001).

Com uma área estratégica, a bacia está entre os estados mais desenvolvidos da região sudeste (SP, RJ e MG), responsáveis por mais de 11% do PIB Nacional, onde no século passado foi implantado conjuntos de empreendimentos hidrelétricos para atender as demandas de energia, principalmente, as associadas ao processo de industrialização da região paulista e fluminense (CEIVAP, 2010).

A bacia também caracteriza-se pelo peculiar desvio das águas para a bacia hidrográfica do rio Guandu com a finalidade de geração de energia e abastecimento de cerca de 9 milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), formando o Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul, um intrincado e complexo conjunto de estruturas hidráulicas existentes nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul e Guandu, que interliga as duas bacias (ANA, 2016).

Tratando-se da economia e principais atividades na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a atividade industrial foi a que mais se desenvolveu, devido a posição estratégica da bacia próxima a centros urbanos e pela viabilização do escoamento da

produção por suas vias. No entanto, deve-se atentar que em termos de captação de água na bacia, a atividade de irrigação atende como o principal consumidor. Os principais usos e demandas hídricas na bacia do Paraíba do Sul são: consumo doméstico, industrial, agropecuário e fins hidroelétricos (CEIVAP, 2010).

III.1. PANORAMA DOS USOS MÚLTIPLOS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Primeiramente, o termo “usos múltiplos” expressa as atividades humanas e os diversos setores da economia que demandam água, podendo os recursos hídricos serem utilizados de forma heterogênea (ANA,2017).

Dos usos múltiplos existentes no Brasil, os principais são: irrigação, abastecimento animal, abastecimento humano e industrial, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer (ANA, 2017). Tais usos podem ser classificados em: usos consuntivos e não consuntivos.

Os usos consuntivos são aqueles em que se retiram uma determinada quantidade de água do manancial e após o consumo, a água é devolvida em quantidade ou qualidade inferior. Neste caso, estão o abastecimento humano, industrial, animal (dessedentação) e irrigação. Os usos não consuntivos são aqueles que não envolvem o consumo direto da água, pois a água é utilizada como um veículo de sua atividade ou ainda quando a atividade capta água do manancial, mas devolve integralmente toda a quantidade de água retirada e na mesma qualidade. Cita-se como exemplos, a geração de energia e a navegação. (SOUZA, 2014)

É importante frisar que cada atividade possui uma demanda hídrica que precisa se enquadrar na disponibilidade de água do manancial utilizado como fonte, por isso a compatibilização do uso da água torna-se um meio de garantir o direito de todos de acessarem o recurso hídrico. Sendo assim, a compatibilização do uso múltiplo da água leva em conta as peculiaridades e as diferentes necessidades de cada uso. Por exemplo, questões como a quantidade de água num corpo d'água são imprescindíveis para a viabilidade da navegação. Já a qualidade é fundamental para o abastecimento humano e para o lazer em balneários, pois estes necessitam de padrões específicos de qualidade de água. (ANA, 2017)

De modo a conhecer as demandas e os usuários presentes no rio Paraíba do Sul, serão descritos os usos relacionados ao abastecimento humano e saneamento,

abastecimento industrial, setor agrícola e geração de energia, pois estas são as atividades mais atuantes na bacia, de acordo com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul (ANA, 2002; AGEVAP, 2013), e que por isso merecem destaque neste estudo.

III.1.1. Usos múltiplos

Dos usos consuntivos destacados no Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, onde cita-se novamente o abastecimento humano e saneamento, abastecimento industrial e setor agrícola, foi constatada uma vazão média de consumo de 54 m³/s no ano de 2010, onde o maior consumidor da bacia é o setor agrícola, que realiza atividades ligadas ao cultivo de cana-de-açúcar, arroz, café, tomate e milho. (AGEVAP, 2013)

O abastecimento humano e saneamento, assim como o abastecimento industrial atendem a grandes cidades e conseqüentemente populações urbanas instaladas na área de drenagem. Embora a bacia hidrográfica tenha uma distribuição quase uniforme em três Estados do sudeste brasileiro (SP, RJ e MG), os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro possuem uma maior vazão de consumo devido a sua densidade demográfica. (AGEVAP, 2013; AGEVAP, 2006).

Os parâmetros utilizados nos cálculos das demandas contempladas no Plano de Recursos Hídricos para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, no que concerne ao abastecimento humano e saneamento, foram: consumo per capita, coeficiente do dia de maior consumo, índices de atendimento e de perdas dos sistemas de abastecimento, coeficiente de retorno dos esgotos e contribuição per capita de carga poluidora (exclusivamente DBO). (ANA, 2002; AGEVAP, 2006)

O consumo per capita foi obtido através da correlação com o contingente populacional na área. Para o coeficiente referente ao dia de maior consumo, adotou-se o valor de 1,2 e como meta para o índice de perdas, adotou-se o valor de 20% da vazão relativa ao dia de maior consumo. O índice de atendimento dos sistemas de abastecimento público de água foi estimado em 95% da população urbana e considerou-se como coeficiente de retorno de esgoto o valor de 0,8, ou seja, 80% da vazão captada retornaria ao manancial de origem da captação. As cargas poluidoras foram estimadas a partir da adoção da contribuição per capita de 54 g/hab.dia, onde levou-se em consideração a

redução proporcionada pelas estações de tratamento de esgotos com uma eficiência de 90% na redução de DBO. (AGEVAP, 2006)

Quanto ao abastecimento industrial, no Plano foi definido o universo das principais indústrias presentes na bacia por meio de dois critérios: indústrias de maior porte e indústrias com as maiores gerações de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio). Isto foi possível através do cadastro industrial que cada Estado possui, onde a partir de uma filtragem soube-se o quantitativo mínimo de indústrias presentes na bacia.

Em relação ao porte das indústrias foram aceitas todas as indústrias com 50 empregados ou mais, independente da topologia. No que refere a geração de DBO cruzou-se os dados da tipologia da indústria com a carga de poluente industrial por empregado, desta forma verificou-se as empresas responsáveis por 95% da carga DBO agregada. A tipologia foi definida pela codificação da atividade conforme a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) e a carga poluente industrial por empregado de cada setor teve sua origem no estudo conduzido pelo Banco Mundial (Industrial Pollution Projection System). (AGEVAP, 2006; AGEVAP 2013)

O Plano da bacia alerta que o resultado final da vazão de captação do abastecimento industrial deve ser considerado com muita prudência e serve apenas para permitir uma visão, bastante preliminar, do uso industrial da água na bacia.

Já o setor agrícola, em seu cálculo de demanda, foi estabelecido diante da correlação da área irrigada com o tipo de cultivo. (AGEVAP, 2006; AGEVAP, 2013)

A Tabela 1 a seguir irá mostrar resumidamente os resultados de demanda obtidos no Plano para os principais usos consuntivos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul em cada Estado que abrange o seu território.

Tabela 1: Demanda dos usos múltiplos consuntivos na bacia do rio Paraíba do Sul. Fonte: AGEVAP, 2013.

| Estado | Abastecimento humano (urbano e rural) e saneamento (m³/s) | Abastecimento industrial (m³/s) | Setor Agrícola (m³/s) |
|----------------|---|---|---|
| São Paulo | 8,76 | 5,13 | 4,46 |
| Rio de Janeiro | 6,92 | 10,51 | 21,82 |
| Minas Gerais | 3,52 | 2,51 | 3,48 |

Tais usos consuntivos, estão regulamentados na lei Federal nº 9.433/97, como passíveis de emissão de outorga. Lembrando que a outorga é uma autorização que o Poder Público concede ao usuário, sob sua dominialidade, para que este utilize determinado volume de água por período pré-determinado, nos termos e nas condições expressas em ato administrativo (ANA, 2016). No caso do rio Paraíba do sul a emissão de outorga é realizada pela Agência Nacional de Água, pois o rio percorre mais de um estado brasileiro, o que o coloca sob o domínio da União.

Porém, há também os usos que não dependem de outorga, por serem considerados de usos insignificantes. Neste caso, os usuários que captam um volume de água insignificante de água devem apenas se cadastrar junto ao respectivo órgão gestor de recursos hídricos.

São considerados usos de água insignificantes: o uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural; as derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes; as acumulações de volumes de água consideradas insignificantes.

III.1.2. Geração de energia

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul possui uma série de reservatórios e usinas hidrelétricas que visam desde a geração de energia elétrica, à regularização de vazões, ao controle de cheias, ao abastecimento de água, ao turismo, ao lazer, bem como ao suprimento de água para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (AGEVAP, 2006).

No processo de implementação das hidrelétricas há a necessidade do pedido de outorga de direito de uso da água para a Agência Nacional de Água (ANA), pois mesmo o uso sendo não consuntivo, as hidrelétricas podem reservar grande quantidade de água a partir de reservatórios de acumulação.

Porém, o requisito para a concessão de implementação não envolve apenas a autorização do uso da água, mas também o estudo que comprove o potencial de energia hidráulica, que antes de ser aprovado necessita que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para rios federais, obtenha uma declaração de reserva de disponibilidade hídrica (DRDH) junto à ANA. (ANA, 2008)

Esta declaração de reserva de disponibilidade hídrica (DRDH) funciona como uma outorga preventiva, indicando que os usos múltiplos da água existentes no local não seriam comprometidos com a reserva de disponibilidade de água para a hidrelétrica. (ANA, 2008). No entanto, após a aprovação da ANEEL quanto ao potencial de energia hidráulica, a DRDH é transformada automaticamente, pelo poder outorgante, numa outorga de direito de uso da água, de modo que se futuramente os usos consuntivos de água extrapolarem os valores de demanda obtidos em projeção, se instalaria um conflito de uso da água dos múltiplos usuários implantados na bacia com o valor da DRDH dada como outorga as hidrelétricas. Esta prática acaba por desfavorecer a instalação de novos usuários na bacia, pois a real disponibilidade hídrica é delimitada pela Vazão Máxima Outorgável (VMO) e não pelas outorgas já concedidas aos empreendimentos hidrelétricos (HORA, 2012).

Quanto ao potencial hidráulico inventariado na bacia, no ano de 2006, foi de aproximadamente 3.000 MW, dos quais 800 MW estão instalados em 33 usinas hidrelétricas. Na bacia do rio Guandu, beneficiária das águas transpostas da bacia do rio Paraíba do Sul, a potência instalada corresponde a 612 MW, distribuídos em três usinas hidrelétricas: Fontes (132MW), Nilo Peçanha (380MW) e Pereira Passos (100MW) (AGEVAP, 2006).

Sendo assim, o sistema hidráulico do Rio Paraíba do Sul (Figura 2) é formado por quatro usinas hidrelétricas UHE Paraibuna, UHE Santa Branca e UHE Jaguari, localizadas no Estado de São Paulo e UHE Funil, localizada no Estado do Rio de Janeiro, pela estação elevatória de Santa Cecília - responsável pela transposição das águas do rio Paraíba do Sul para o Guandu - pelo complexo hidrelétrico do Ribeirão das Lajes/Piraí com os reservatórios de Santana, Vigário, Tocos e Lajes e pelas usinas hidrelétricas de Fontes, Nilo Peçanha e Pereira Passos e a usina elevatória de Vigário. A jusante de Santa Cecília, situam-se os aproveitamentos hidrelétricos de Sobragi, no rio Paraibuna (MG), Picada no rio Peixe, Simplício e Ilha dos Pombos no próprio Paraíba do Sul e Barra do Braúna no Rio Pomba. (CEIVAP, 2010)

As usinas hidrelétricas do sistema hidráulico do Rio Paraíba do Sul: UHE Paraibuna, UHE Santa Branca, UHE Jaguari e UHE Funil serão descritas adiante no item III.2 e estarão em foco neste estudo por possuírem reservatórios de regularização e por se localizarem antes da transposição das águas do rio Paraíba do sul para o rio Guandu, desempenhando um papel fundamental no abastecimento de água da região metropolitana do Rio de Janeiro.

No entanto, devido a complexidade de operação do sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul e a sua importância, diferentes configurações institucionais e legais foram criadas ao longo dos anos. Desde 1970, a operação do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul tem sido alvo de diversas regulamentações. O Decreto nº 68.324/1971, que aprovou o plano de regularização do rio Paraíba do Sul, por exemplo, condicionou a operação dos reservatórios à manutenção de descarga mínima para jusante de Santa Cecília de 90 m³/s e de bombeamento máximo de 160 m³/s. A Portaria DNAEE nº 22/1977 estipulou uma série de regras para o sistema, enquanto o Decreto nº 81.436/1978 permitiu que, durante a ocorrência de situações hidrológicas críticas, a vazão mínima a jusante de Santa Cecília fosse de 71 m³/s (ANA, 2015).

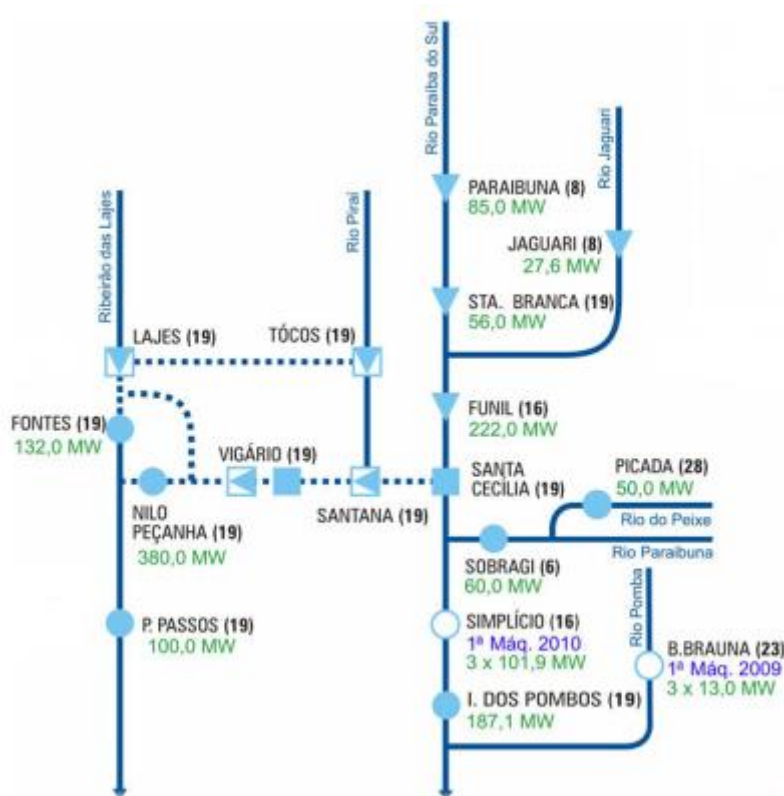


Figura 2: Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul. Fonte: CEIVAP, 2010.

Em 26 de maio de 2003, a Agência Nacional de Águas (ANA) emitiu a Resolução nº 211, que dispôs sobre as regras a serem adotadas para a operação do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul em substituição as da década de 70 e preconizou que a descarga mínima a jusante dos aproveitamentos fosse de 30 m³/s em Paraibuna; 40 m³/s em Santa Branca; 10 m³/s em Jaguarari; 80 m³/s em Funil; 71 m³/s em Santa Cecília; e 120 m³/s em Pereira Passos. No entanto, quando a vazão incremental entre Funil e Santa Cecília fosse

maior que 110 m³/s, 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 (ANA, 2015).

Porém com o advento da crise hídrica nos anos de 2014-2015, considerada a pior seca dos últimos 85 anos no rio Paraíba do Sul, uma nova regulamentação de operação do sistema hidrelétrico do Paraíba do sul foi formulada conjuntamente com técnicos da ANA, DAEE, IGAM, INEA e AGEVAP, acompanhados por representantes do Ministério da Integração e dos operadores de saneamento (Sabesp, Cedae, Saaetri, Saae Jacareí e P.M. Santa Branca), com objetivo de identificar as medidas necessárias para adequação à situação de escassez.

Assim, surgiu a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1382, de 07 de dezembro de 2015, que regulamentou as seguintes vazões mínimas de jusante aos aproveitamentos: 10 m³/s em Paraibuna; 30 m³/s em Santa Branca; 4 m³/s em Jaguari; 70 m³/s em Funil; 71 m³/s em Santa Cecília; 119 m³/s (média diária) a ser bombeado em Santa Cecília para o rio Guandu e 120 m³/s em Pereira Passos (ANA, 2014)

Mesmo com a nova alteração na regulamentação do sistema hidráulico do Paraíba do Sul, existiu a possibilidade de agravamento da crise hídrica, no entanto, nenhuma medida de restrição de usos no rio Paraíba do Sul foi tomada e os usos múltiplos continuaram sendo garantidos (ANA, 2015).

III.2. CARACTERIZAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS

No rio Paraíba do Sul, foram construídos aproveitamentos hidrelétricos e reservatórios, principalmente entre os anos de 1930 e 1960, como a Paraibuna/Paraitinga, Santa Branca, Funil, Santa Cecília e Ilha dos Pombos. Cabe também destacar o sistema Paraíba do Sul/Guandu, o qual, mediante a transposição das águas do rio Paraíba do Sul em Santa Cecília, permite o abastecimento da Região Metropolitana no Rio de Janeiro e ainda supre a demanda de energia elétrica (ANA, 2018).

III.2.1. Usina Hidrelétrica de Paraibuna

A Usina Hidrelétrica de Paraibuna (Figura 3), localizada no Rio Paraibuna, tem potência total instalada de 87 MW e é operada pela Companhia Energética de São Paulo (CESP). A área total do seu reservatório é de 224 km² e é composta pelo reservatório de

Paraibuna que tem 177 km² e pelo reservatório de Paraitinga, com 47 km². A usina foi concluída em 1978 e está localizada no município de Paraibuna. A sua principal finalidade é regular a vazão do Rio Paraíba do Sul, responsável pelo fornecimento de água para várias cidades do Vale do Paraíba e do Estado do Rio de Janeiro (CESP, 2018).

Dentre os reservatórios da bacia associados às usinas com mais de 30 MW de potência instalada, o reservatório de Paraibuna/Paraitinga possui o maior volume útil (4.731 hm³), conferindo-lhe a capacidade de regularização plurianual de vazões, muito importante para fins de geração de energia elétrica (CEIVAP, 2010).

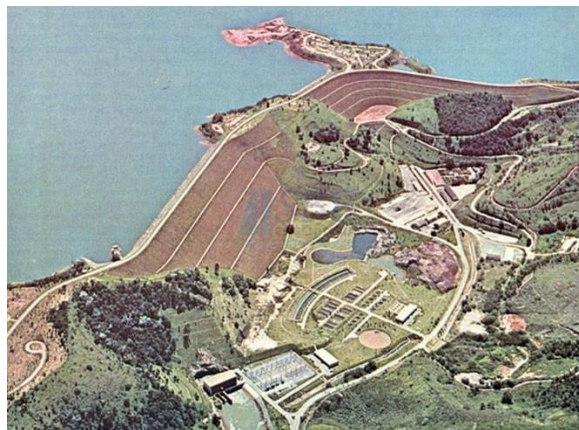


Figura 3: Usina Hidrelétrica de Paraibuna vista do alto. Fonte: SBB Engenharia

III.2.2. Usina Hidrelétrica de Santa Branca

Com potência de 56 MW a Usina Hidrelétrica de Santa Branca (Figura 4) é operada pela Light Energia desde 1999 quando iniciou-se sua operação. Localizada no rio Paraíba do Sul e dentro do Estado de São Paulo, a usina exerce a função de controle de cheias e ajuda a minimizar os vertimentos em períodos chuvosos através do seu volume de regularização (CEIVAP, 2010).

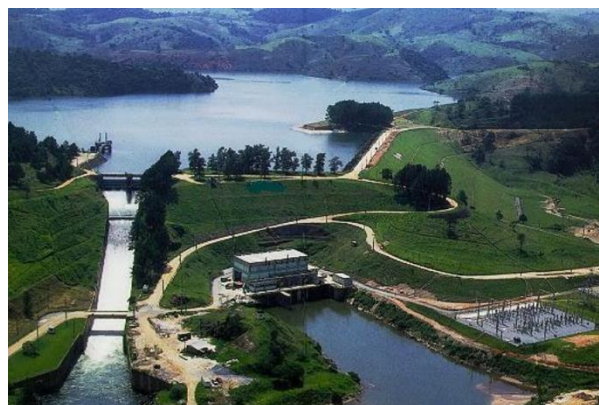


Figura 4: Usina Hidrelétrica de Santa Branca vista do alto. Fonte: Diário de Canoas

III.2.3. Usina Hidrelétrica de Jaguari

A Usina Hidrelétrica Jaguari (Figura 5) está localizada no Rio Jaguari, entre os municípios de Jacareí e São José dos Campos, no Estado de São Paulo. Sua potência instalada é de 27,6 MW, operados pela Companhia Energética de São Paulo (CESP) desde 1972. Seu reservatório tem 56 km² de extensão e sua principal finalidade é permitir o controle da vazão do Rio Paraíba do Sul, que é o fornecedor de água de várias cidades, tanto do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo, quanto do Estado do Rio de Janeiro (CESP, 2018).



Figura 5: Usina Hidrelétrica de Jaguari vista do alto. Fonte: SBB Engenharia

III.2.4. Usina Hidrelétrica de Funil

A operação da Usina Hidrelétrica de Funil (Figura 6) teve início em 1969 e possui uma potência de 216 MW. Localizada em Itatiaia, no Estado do Rio de Janeiro, é considerada de grande importância por estar posicionada próxima aos grandes centros consumidores, garantindo confiabilidade do suprimento de energia elétrica aos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo. Outro aspecto que evidencia a importância desta usina é sua barragem que, ao possibilitar a regularização do volume de sua vazante, reduz a frequência e a intensidade das cheias que ocorrem nas cidades a jusante (FURNAS, 2018).



Figura 6: Usina Hidrelétrica de Funil. Fonte: Furnas

A ficha técnica dos aproveitamentos em estudo encontra-se detalhada nas Tabela

2 e

Tabela 3 a seguir.

Tabela 2: Características dos Aproveitamentos Hidrelétricos

| Usina | Potência Instalada (MW) | Rendimento | Queda de Referência (m) | NA Normal (m) | | | Volume NA Normal (hm ³) | | Volume Útil (hm ³) | Perdas Hidráulicas (m) |
|--------------|-------------------------|------------|-------------------------|---------------|--------|---------|-------------------------------------|--------|--------------------------------|------------------------|
| | | | | Mínimo | Máximo | Jusante | Mínimo | Máximo | | |
| Paraibuna | 86 | 89 | 87 | 694,6 | 714 | 626,4 | 2096 | 4732 | 2376 | 2,16 |
| Santa Branca | 56 | 90 | 45,8 | 605 | 622 | 577,2 | 131 | 439 | 308 | 0,8 |
| Jaguari | 28 | 87 | 66,7 | 603 | 623 | 557,5 | 443 | 1236 | 793 | 0,5 |
| Funil | 216 | 84 | 72,3 | 444 | 466,5 | 394,3 | 283 | 888 | 605 | 1,5 |

Tabela 3: Curvas características dos Aproveitamentos Hidrelétricos

| Coeficientes das Curvas | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|---------------|------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Usina | Cota x Área | | | | | Volume x Cota | | | | |
| | A0 | A1 | A2 | A3 | A4 | A0 | A1 | A2 | A3 | A4 |
| Paraibuna | -17222,28 | 12,3779 | -0,0168791 | -0,000013775 | 2,5703 ⁻⁰⁸ | 662,4348 | 0,0224 | -4,4028 ⁻⁰⁶ | 5,5049 ⁻¹⁰ | -2,8359 ⁻¹⁴ |
| Santa Branca | 9849,289 | -33,01889 | 0,0276975 | 0 | 0 | 592,7759 | 0,1044509 | -8,62202 ⁻⁰⁵ | - | - |
| Jaguari | -22398,2 | 94,1086 | -0,08942378 | -7,37357 ⁻⁰⁵ | 1,086109 ⁻⁰⁷ | 579,636 | 0,07408595 | -5,98167 ⁻⁰⁵ | 3,14091 ⁻⁰⁸ | -6,90318 ⁻¹² |
| Funil | 29506,8 | -192,916 | 0,418396 | -0,00030067 | 0 | 421,2278 | 0,104427 | -9,56729 ⁻⁰⁵ | 3,99597 ⁻⁰⁸ | 0 |
| Usina | Vazão x NAjusante | | | | | | | | | |
| | A0 | A1 | A2 | A3 | A4 | | | | | |
| Paraibuna | 625 | - | - | - | - | | | | | |
| Santa Branca | 575,36 | - | - | - | - | | | | | |
| Jaguari | 555,8 | - | - | - | - | | | | | |
| Funil | 392,7 | - | - | - | - | | | | | |

III.3. O MOSAICO INSTITUCIONAL DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Antes de entender o mosaico institucional específico a bacia, tem-se que a matriz institucional do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é essencial para a tomada de decisão e gestão das águas, garantindo sua disponibilidade em quantidade e qualidade adequada para as presentes e futuras gerações. Por isso, a matriz conta com conselhos (Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), Conselho Estadual de Recursos Hídricos), governos (a exemplo do Ministério de Meio Ambiente), órgãos gestores (Agência Nacional de Águas), fórum de debates (Comitê de bacia) e escritório técnico (Agência de água). (ANA, 2017)

O CNRH e os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal (CERHs) são órgãos consultivos e deliberativos que têm a função de formular a política dos recursos hídricos numa jurisdição e deliberar como instância final sobre diversos temas relacionados aos recursos hídricos. Por outro lado, a ANA é a entidade federal que atua na implementação da PNRH. (ANA, 2017)

Quanto aos comitês de bacia hidrográfica, estes possuem a função de promover a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos, atuando na implementação dos instrumentos de gestão, da negociação de conflitos pelo uso da água e da promoção dos diferentes usos da água na bacia. Sua atuação pode englobar diferentes limites geográficos, sendo um comitê interestadual quando for responsável por bacias hidrográficas cujas áreas se expandam em mais de um estado, comitê estadual, quando sua área de atuação se restringir ao limite de uma ou mais bacias hidrográficas inseridas no território de um único estado e comitês únicos, quando há uma única instância deliberativa no âmbito das bacias estaduais e interestaduais, sendo criados tanto pelo CNRH quanto pelos conselhos dos estados envolvidos. (ANA, 2015)

Sobre o escritório técnico existe as agências de água ou de bacia, que são entidades técnicas e executivas que atuam em apoio aos comitês, colaborando na elaboração dos planos de recursos hídricos e na administração financeira dos recursos arrecadados com a cobrança pelo uso da água. Suas atividades são supervisionadas pelos respectivos Comitês de bacia a que estão vinculadas. Sua criação é autorizada pelo CNRH ou pelos CERHs mediante solicitação de um ou mais comitês de bacia hidrográfica. A função da agência de bacia, pela Lei nº 10.881/2004, permite ser exercida por “entidades delegatárias”, que são organizações civis sem fins lucrativos. (ANA, 2016)

No caso do Paraíba do sul a entidade técnica e executiva é a agência de água nomeada como Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP) vinculada ao Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP).

Considerando as dimensões da bacia do rio Paraíba do Sul fez se necessário a adoção de organismos de sub-bacia para atuar conjuntamente com o comitê de integração, o CEIVAP. Os organismos de sub-bacia existentes atualmente são (Figura 7):

- i. Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) Médio Paraíba do Sul
- ii. Comitê Piabanha
- iii. CBH Rio Dois Rios
- iv. CBH Baixo Paraíba do Sul e Itabopoana
- v. CBH Paraíba do Sul – Trecho Paulista
- vi. Comitê dos Afluentes Mineiros do Preto e Paraibuna
- vii. Comitê dos Afluentes Mineiros do Pomba e Muriaé
- viii. Comitê Guandu

Quanto ao Comitê Guandu, apesar de sua área de atuação propriamente dita (as bacias dos rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim, no estado do Rio de Janeiro) não estar situada na bacia do Paraíba do Sul, o mesmo precisa ser contemplado, visto que possui forte vínculo hídrico com a bacia do rio paraíba do sul. De modo que, em ambos há a preocupação comum com a preservação e recuperação dos cursos d'água (CEIVAP, 2019).

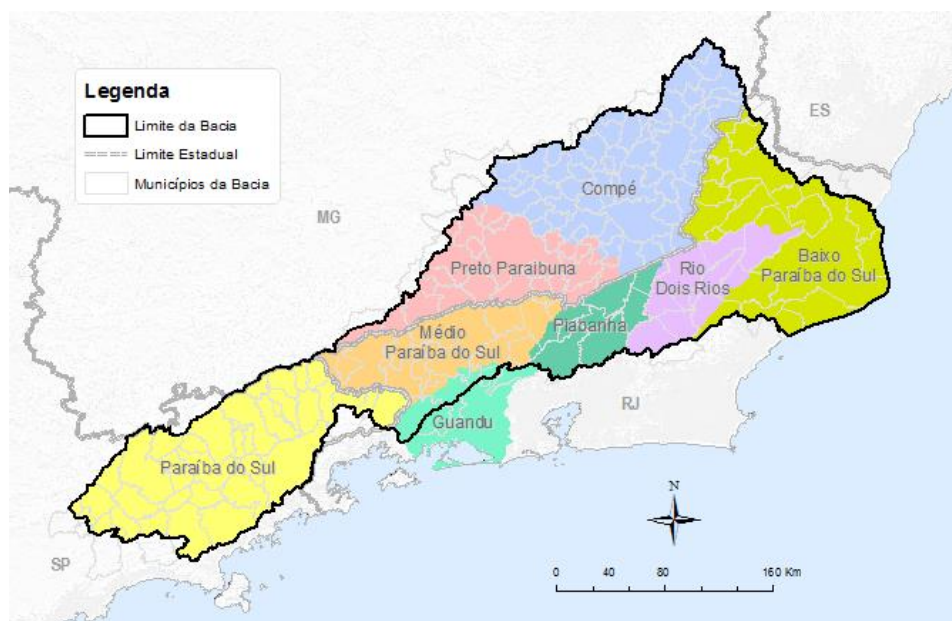


Figura 7: Divisão dos organismos de sub-bacia da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Fonte: CEIVAP, 2019

Esses organismos de sub-bacia podem desempenhar o papel de interlocutores regionais e agregar informações específicas ao processo de gestão, porém ao atuarem legalmente na função de agência de bacia, aumenta-se a possibilidade de duplicação de esforços ou superposição de atuações, dificultando substancialmente a harmonização do conjunto (CEIVAP, 2019).

CAPÍTULO 4

IV. USO DO SOFTWARE SisUCA

O SisUCA é uma ferramenta computacional desenvolvida nas linguagens C++ e Delphi, que tem por finalidade simular a produção de energia elétrica em um conjunto de aproveitamentos de uma mesma bacia hidrográfica, contemplando e compatibilizando cenários prospectivos de usos consuntivos da água, limitados ao valor da vazão máxima outorgável (VMO), bem como priorizando a disponibilidade hídrica para jusante dos aproveitamentos (HORA, 2012).

A ferramenta foi desenvolvida para ser utilizada em qualquer bacia hidrográfica do Brasil. Ela foi inicialmente utilizada no estudo de caso da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia e os resultados alcançados indicaram que a presença de vazões incrementais naturais negativas¹ interferem na simulação hidráulica-energética. De acordo com HORA (2012), a presença de incrementais negativas significa uma inconsistência numérica, além de uma contradição conceitual e, portanto, a autora recomendou a revisão das séries de vazões naturais do ONS. Cabe destacar que esta bacia é a maior em território nacional e possui dois empreendimentos hidrelétricos, cujos reservatórios somados representam o maior estoque de volume útil ou energia armazenada do SIN: Serra da Mesa e Tucuruí (ANA, 2018).

Em seguida, a ferramenta foi aplicada na bacia do rio Piabanha, afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul, com área de drenagem de 2.065 km², onde apesar das dificuldades enfrentadas para obtenção dos dados dos aproveitamentos hidrelétricos, não foram observadas limitações nas simulações efetuadas, pois o SisUCA convergiu em todos os cenários de retiradas de água (CHIAPPORI, 2015).

No presente estudo, serão simulados os aproveitamentos hidrelétricos com reservatórios de regularização localizados no rio Paraíba do Sul (UHE Paraibuna, UHE Santa Branca e Funil) e no rio Jaguari, afluente pela margem esquerda do rio Paraíba do Sul, onde está localizada a UHE Jaguari.

¹ De acordo com ONS (2007), a vazão natural corresponde àquela que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse as ações antrópicas na bacia contribuinte, ou seja, retirando-se os efeitos da operação dos reservatórios existentes a montante e incorporando as vazões relativas à evaporação líquida nos reservatórios e aos usos consuntivos da água na bacia, representados pelas atividades de irrigação, criação animal e abastecimento urbano, rural e industrial.

HORA (2012) menciona que a vazão natural embute o conceito de ausência de ações antrópicas na bacia contribuinte, induzindo que as vazões sejam sempre crescentes de montante para jusante.

Os demais dados das usinas hidrelétricas necessárias à execução do programa, foram selecionados a partir de informações da ficha técnica das usinas no website das concessionárias CESP, Furnas e Light. As informações não encontradas no website como nível de água a jusante (m), queda de referência (m) e engolimento máximo (m³/s) foram complementadas através do SIPOT (Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro) e da Eletrobrás.

Inicialmente, é necessário definir a topologia da cascata de empreendimentos que será introduzida na janela inicial do SisUCA. Deve-se determinar qual usina localiza-se a montante, jusante e em qual rio, se no principal ou afluente. Sendo assim, a topologia das usinas hidrelétricas abordadas neste estudo foi definida como mostrado na Figura 8 e todo passo a passo para a execução do programa poderá ser encontrado no anexo VIII.1.

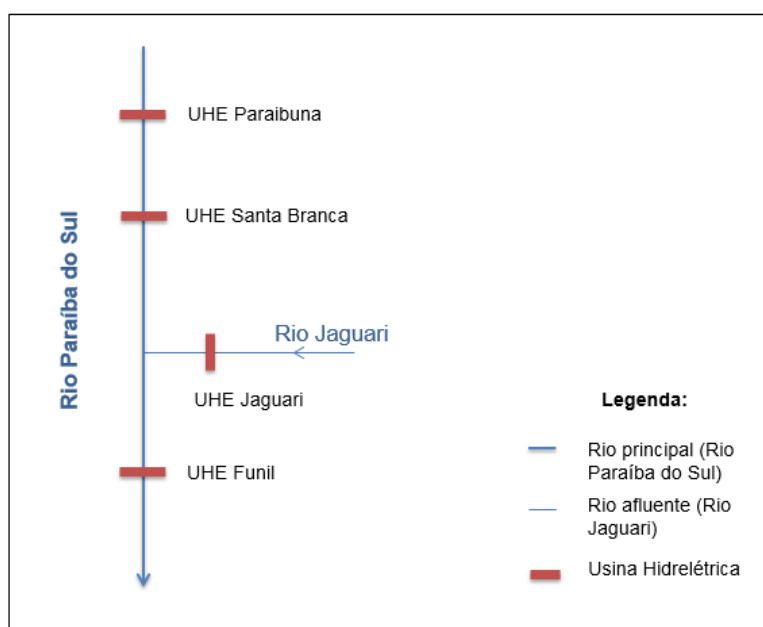


Figura 8: Topologia de 4 empreendimentos hidrelétricos no Rio Paraíba do Sul

Verificando a consistência numérica do histórico de vazões a serem inseridos no software, que se encontram no anexo VIII.2, é necessário analisar a continuidade de vazão no rio Paraíba do sul.

IV.1. ANÁLISE DE CONTINUIDADE DAS VAZÕES

O estudo de continuidade de vazões é realizado com o intuito de verificar a existência de incrementais negativas. A lógica natural de um fluxo de água consiste de

que a vazão de jusante num trecho seja maior que a vazão de montante, devido a contribuição de água da área de drenagem, da vazão adicionada por um rio afluente e pela própria manutenção do fluxo de água no trecho.

A análise de continuidade ocorrerá com duas classificações de vazão: natural e afluente. A vazão natural é aquela que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse, a montante, ações antrópicas na bacia, como a regularização de reservatórios, transposições de vazão e captações para diversos fins. A vazão afluente é a quantidade de água que chega ao reservatório num determinado tempo após retiradas de água serem realizadas a montante seja para dessedentação de animais ou qualquer tipo de atividade antrópica. (HORA, 2012). Como a vazão natural não prevê a interferência de consumo humano ou animal da água, é de se esperar que o valor de vazão natural seja maior que o da vazão afluente.

No caso da vazão natural de jusante ser menor que a vazão natural de montante, configura-se a incremental negativa no trecho. Tendo em vista que a vazão natural representa a condição do rio sem nenhuma interferência antrópica, e que a vazão aumenta, de montante para jusante, com o aumento da área de drenagem contribuinte, a existência de incremental negativa representa uma inconsistência.

Sendo assim, foi obtido no site do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) a série de vazões naturais e afluentes para as usinas hidrelétricas de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil.

A série de vazões naturais será utilizada no SisUCA para a realização de simulações de cenários que computarão usos consuntivos de água a partir de percentuais da VMO e um cenário sem uso consuntivo. Estas simulações emitirão dados de geração de energia e perdas suscetíveis ao longo do aumento dos usos consuntivos.

Com a série de vazões afluentes pretende-se verificar a forma de operação atual das usinas hidrelétricas com a forma de operação do SisUCA.

A relação de continuidade entre as vazões deverá respeitar a topologia existente para o conjunto de empreendimentos hidrelétricos, por isso o esquema simplificado das usinas está retratado na Figura 9, onde se retira duas condições:

$$Q_{sb} - Q_p > 0 \quad (\text{Condição 1})$$

$$Q_f - (Q_{sb} + Q_j) > 0 \quad (\text{Condição 2})$$

Onde,

Q_{sb} : Vazão da usina hidrelétrica de Santa Branca, em m^3/s .

Q_p : Vazão da usina hidrelétrica de Paraibuna, em m^3/s .

Q_f : Vazão da usina hidrelétrica de Funil, em m^3/s .

Q_j : Vazão da usina hidrelétrica de Jaguari, em m^3/s .

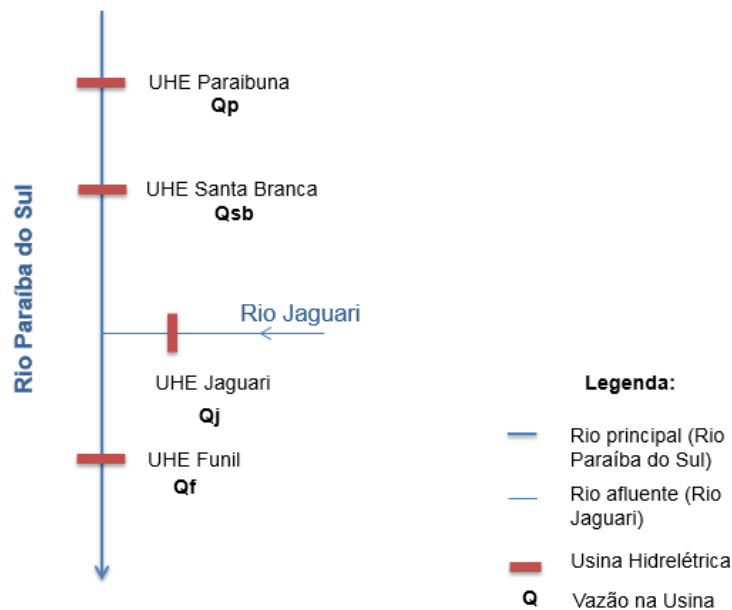


Figura 9: Topologia das Usinas Hidrelétricas Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil presentes na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

O período de dados de vazão afluente disponibilizado pelo ONS foi de 1999 a 2010. Os dados de vazão afluente mensal foram dispostos numa planilha de Excel, onde realizou-se a implementação das duas condicionantes. Do total de 144 ocorrências foram constatados 69 casos de incremental negativa no trecho de Paraibuna até Santa Branca (Condição 1), já no trecho de Santa Branca+Jaguari até Funil (Condição 2) não foram encontradas incrementais negativas.

Devido a presença de incrementais negativas no histórico de vazão afluente, não será possível realizar a comparação de energia gerada pelo ONS com as simuladas pelo SisUCA utilizando as vazões afluentes. Pois a operação do SisUCA com vazões que apresentam incrementais negativas gera uma inconsistência matemática nos resultados.

Quanto a série de vazões naturais, as mesmas foram tratadas de forma análoga as vazões afluentes em planilha de Excel, no período de 1999 a 2010, porém não foi observado caso de incremental negativa nos dados.

Também foi comparado os valores de vazão afluente e natural, onde estabeleceu-se uma nova condicionante, a vazão natural deve ser maior que a vazão afluente e concluiu-se que dos 144 meses analisados, 26 apresentaram uma diferença percentual negativa ou nula, ou seja, foi configurado uma inconsistência de dados onde a vazão afluente conseguiu ser maior que a vazão natural.

IV.2. VALIDAÇÃO DO USO DO SOFTWARE

Diante da impossibilidade de verificar a confiabilidade dos resultados gerados no SisUCA mediante as vazões afluentes fornecidas pelo ONS, devido a presença de incrementais negativas na série, a confiabilidade dos dados será validada a partir da tese desenvolvida pelo D.Sc Antonio Ferreira da Hora, aplicada no concurso de professor titular da Universidade Federal Fluminense, com o tema: “O Setor Elétrico Brasileiro e sua Influência na Gestão dos Recursos Hídricos – Uma proposta para Outorga e Operação Hidráulica dos Aproveitamentos Hidrelétricos” com área de estudo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. A tese trouxe uma proposta de operação semelhante ao do SisUCA, onde ambas propõem que a geração de energia não seja baseada na demanda do mercado de energia.

Hora (2003) defende a ideia de que a energia produzida na usina hidrelétrica fosse otimizada para atender prioritariamente a bacia em que está contida, mantendo-se a vazão mínima regularizada. Isto, rebate a operação do ONS que deplecionaria o volume de água do reservatório para atender a demanda de energia em outra bacia, devido a interconexão dos sistemas elétricos centralizada no Sistema Interligado Nacional (SIN)². Tal atitude do operador, causa desequilíbrio e compromete a vazão mínima defluente a jusante da usina quando a quantidade de água do reservatório não é repostada. Pois, no dimensionamento e na construção de um reservatório, a interligação do sistema não é computada para o cálculo da vazão mínima regularizada.

O modelo matemático utilizado por Hora (2003) para as simulações foi o Engehidro, onde para as UHE Paraibuna e UHE Jaguari considerou-se as vazões afluentes

SIN²: é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, onde através da interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, é propiciado a transferência de energia entre subsistemas (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte) possibilitando a obtenção de ganhos sinérgicos de energia e a exploração da diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias.

disponibilizadas pelo ONS e as vazões defluentes foram as oriundas pela metodologia proposta, que limitou o turbinamento máximo à vazão regularizada durante o período de deplecionamento e reenchimento do reservatório. Já para as UHE Santa Branca e UHE Funil foram calculadas as vazões incrementais de cada trecho ao subtrair as vazões afluentes pelas defluentes.

O período de dados trabalhados foram de 1993 a 2001, que englobou os oito anos que antecederam o acontecimento de racionamento de energia, no Brasil, em 2001. Além de abranger, pelo menos, 8 ciclos hidrológicos e toda e qualquer regularização pluri anual do setor elétrico. Ou seja, neste tempo de dados muito provavelmente houve a ocorrência de transferência de água de um período hidrológicamente favorável para o desfavorável, já que a capacidade de transferência pode durar de 3 a 4 anos.

Sendo assim, aproveitou-se os resultados apresentados por Da Hora (2003) para comparar com a energia gerada pelo SisUCA. As Tabela 4 e Tabela 5 adiante contêm três tipos de informações para cada usina hidrelétrica: i) Energia gerada e operada pelo ONS; ii) Energia gerada pela proposta da tese de Hora (2003); iii) Energia gerada pelo SisUCA

Tabela 4: Geração de energia para as Usinas Hidrelétricas de Paraibuna e Santa Branca, considerando a operação do ONS, Engehidro e SisUCA.

| Paraibuna | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| Ano | Energia (MWh.ano) | | |
| | ONS | Tese (HORA, 2003) | SisUCA |
| 1993 | 297.163 | 299.024 | 533.746 |
| 1994 | 353.363 | 383.530 | 476.631 |
| 1995 | 229.315 | 382.132 | 467.189 |
| 1996 | 502.865 | 417.968 | 497.461 |
| 1997 | 459.560 | 423.872 | 493.833 |
| 1998 | 464.247 | 419.257 | 478.233 |
| 1999 | 379.005 | 418.711 | 470.682 |
| 2000 | 380.660 | 413.834 | 451.595 |
| 2001 | 362.423 | 402.473 | 423.482 |

| Santa Branca* | | | |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| Ano | Energia (MWh.ano) | | |
| | ONS | Tese (HORA, 2003) | SisUCA |
| 1993 | | | |
| 1994 | | | |
| 1995 | | | |
| 1996 | | | |
| 1997 | | | |
| 1998 | | | |
| 1999 | | | |
| 2000 | 215.404 | 257.885 | 294.344 |
| 2001 | 224.589 | 255.002 | 282.061 |

* Os dados geração de energia da Usina Hidrelétrica de Santa Branca consta apenas nos anos de 2000 e 2001, pois o início de sua operação ocorreu a partir de dezembro de 1999.

Tabela 5: Geração de energia para as Usinas Hidrelétricas de Jaguari e Funil, considerando a operação do ONS, Engehidro e SisUCA.

| Jaguari | | | | Funil | | | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| Ano | Energia (MWh.ano) | | | Ano | Energia (MWh.ano) | | |
| | ONS | Tese (HORA, 2003) | SisUCA | | ONS | Tese (HORA, 2003) | SisUCA |
| 1993 | 85.140 | 82.503 | 142.965 | 1993 | 705.084 | 722.937 | 1.064.329 |
| 1994 | 76.207 | 102.736 | 123.211 | 1994 | 921.927 | 913.756 | 944.071 |
| 1995 | 85.553 | 106.716 | 125.065 | 1995 | 713.825 | 1.076.011 | 1.065.493 |
| 1996 | 136.832 | 116.831 | 132.318 | 1996 | 1.328.206 | 1.333.457 | 1.201.928 |
| 1997 | 142.689 | 120.079 | 132.754 | 1997 | 1.073.396 | 1.047.871 | 1.059.096 |
| 1998 | 108.866 | 117.840 | 127.007 | 1998 | 965.320 | 1.068.438 | 1.123.937 |
| 1999 | 124.815 | 120.540 | 126.488 | 1999 | 1.019.925 | 1.116.841 | 1.075.271 |
| 2000 | 71.246 | 115.089 | 116.296 | 2000 | 926.225 | 1.063.663 | 1.089.929 |
| 2001 | 93.974 | 109.692 | 104.990 | 2001 | 805.307 | 927.739 | 933.005 |

Considerando a geração de energia produzida pela cascata de empreendimentos, tem-se a Tabela 6. Esta ainda demonstra a diferença percentual de geração de energia entre o SisUCA e a proposta da tese de Hora (2003) com a aplicação do Engehidro e a diferença percentual do SisUCA com o ONS.

Tabela 6: Diferença percentual da geração de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul considerando a operação do ONS, Engehidro e SisUCA.

| Cascata de usinas | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Ano | Energia (MWh.ano) | | | Diferença % do SisUCA com Tese | Diferença % do SisUCA com ONS |
| | ONS | Tese (HORA, 2003) | SisUCA | | |
| 1993 | 1.087.387 | 1.104.464 | 1.741.040 | 37% | 38% |
| 1994 | 1.351.497 | 1.400.022 | 1.543.913 | 9% | 12% |
| 1995 | 1.028.693 | 1.564.859 | 1.657.746 | 6% | 38% |
| 1996 | 1.967.903 | 1.868.256 | 1.831.707 | -2% | -7% |
| 1997 | 1.675.645 | 1.591.822 | 1.685.683 | 6% | 1% |
| 1998 | 1.538.433 | 1.605.535 | 1.729.177 | 7% | 11% |
| 1999 | 1.523.745 | 1.656.092 | 1.672.441 | 1% | 9% |
| 2000 | 1.593.535 | 1.850.471 | 1.952.164 | 5% | 18% |
| 2001 | 1.486.293 | 1.694.906 | 1.743.538 | 3% | 15% |

Analisando a diferença percentual do SisUCA com o Engehidro, verifica-se que o SisUCA apresenta uma otimização de energia maior em 7 dos 9 anos trabalhados, com variação entre 1 e 10% de energia, exceto o ano de 1993 com 37%.

A diferença percentual entre o SisUCA e o ONS revela que o SisUCA conseguiu otimizar mais a energia em comparação ao ONS, exceto no ano de 1996, onde a diferença ficou em 5%.

Pela proposta do SisUCA e Hora (2003) serem, ambas, voltadas ao aumento de disponibilidade de água na bacia e a otimização da produção de energia, verifica-se que o SisUCA demonstrou confiabilidade apresentando uma diferença percentual média de 8% em comparação ao Engehidro.

IV.3. LEVANTAMENTO E CONSISTÊNCIA DE DADOS

O banco de dados formulado no Access 2016 foi editado a partir de informações pertencentes a ficha técnica das usinas presente na website das suas respectivas concessionárias CESP, Furnas e Light. Porém, muitos dados foram complementados com dados fornecidos pelo ONS e pela Eletrobrás.

O valor da Vazão Máxima Outorgável (VMO) foi obtido a partir do cálculo da $Q_{95\%}$, sendo o mesmo computado pela ANA (Agência Nacional de Água) como 70% da $Q_{95\%}$. Este valor foi computado pelo fato do rio Paraíba do sul ser um rio federal (o rio percorre diferentes estados brasileiros), caso estivéssemos tratando de um rio estadual, onde os limites do rio permanecem em um único estado, o cálculo da VMO se daria de acordo com a legislação do órgão estadual competente.

A $Q_{95\%}$ foi conceituada com o método de distribuição de frequências, no qual permite verificar a frequência com que os valores se repetem ou são superiores a um determinado evento, que nesse caso é a vazão garantida em 95% do tempo.

Sendo assim, numa planilha de Excel, as vazões naturais foram organizadas de maneira crescente e foram computadas sua ordem numérica, sua probabilidade ($n^\circ/(n^\circ \text{ total}+1)$) e permanência em % ($1 - \text{permanência}_n$). Após este passo, foi localizado o valor de vazão natural que continha a permanência como 95% e esta foi enquadrada como a $Q_{95\%}$.

Este cálculo se repetiu duas vezes de modo a atender aos dois períodos de dados necessários ao desenvolvimento deste estudo: i) 1993-2001, que engloba o tempo de dados da tese de Hora (2003) para a verificação da confiabilidade dos resultados do SisUCA; ii) 1999-2010, que é o período de dados trabalhados neste estudo. Sendo assim, cada usina hidrelétrica tem um valor diferente de $Q_{95\%}$ e VMO em cada período. A Tabela

7, representa os resultados de 1993 a 2001 e a Tabela 8 resume os resultados do intervalo de tempo entre 1999 a 2010.

Tabela 7: $Q_{95\%}$ mensal e VMO para as usinas hidrelétricas de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil, no rio Paraíba do Sul, no período de 1993 a 2001

| Vazões (m³/s) | UHE Paraibuna | UHE Santa Branca | UHE Jaguari | UHE Funil |
|---------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| Q_{95%} mensal | 33,5 | 43 | 11 | 99 |
| VMO | 23,45 | 30,1 | 7,7 | 69,3 |

Tabela 8: $Q_{95\%}$ mensal e VMO para as usinas hidrelétricas de Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil, no rio Paraíba do Sul, no período de 1999 a 2010

| Vazões (m³/s) | UHE Paraibuna | UHE Santa Branca | UHE Jaguari | UHE Funil |
|---------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| Q_{95%} mensal | 29 | 35,5 | 10 | 86,5 |
| VMO | 20,3 | 24,85 | 7 | 60,55 |

CAPÍTULO 5

V. RESULTADOS

A aplicação do software ocorreu para 2 (dois) períodos diferentes de simulações, de modo que em cada foi apresentado cenários com percentuais diferentes de uso da VMO (Vazão Máxima Outorgável). A motivação para o mesmo, assim como seus resultados serão relatados adiante.

O primeiro período de dados analisados foi de 1993 a 2001, que corresponde ao tempo trabalhado pela tese de Hora (2003). A comparação entre a energia gerada e demonstrada no estudo de Hora (2003) com os da simulação do SisUCA permitiu a verificação da confiabilidade do programa. Sendo assim, nesta simulação, aproveitou-se para elaborar os cenários propostos nos objetivos deste trabalho, a partir de usos consuntivos de água correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100% da VMO.

Sendo assim, as Tabela 9 e

Tabela 10 apresentam a energia gerada em cada usina para os cinco cenários estipulados nesse período, assim como a diminuição da geração de energia associada ao aumento dos usos consuntivos:

- Cenário 1.1: Sem usos consuntivos.
- Cenário 1.2: Com usos consuntivos a partir de 25% da VMO.
- Cenário 1.3: Com usos consuntivos a partir de 50% da VMO.
- Cenário 1.4: Com usos consuntivos a partir de 75% da VMO.
- Cenário 1.5: Com usos consuntivos a partir de 100% da VMO.

Tabela 9: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Paraibuna e UHE Santa Branca no período de 1993 a 2001

| VMO (%) | Paraibuna | | | VMO (%) | Santa Branca | | |
|------------|--------------------|--------------|-----------|------------|--------------------|--------------|-----------|
| | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) | | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) |
| 0 | 476.983,39 | 100 | 0 | 0 | 280.146,02 | 100 | 0 |
| 25 | 440.903,16 | 92,4 | 7,6 | 25 | 251.549,01 | 89,8 | 10,2 |
| 50 | 407.205,04 | 85,4 | 14,6 | 50 | 227.134,26 | 81,1 | 18,9 |
| 75 | 370.617,26 | 77,7 | 22,3 | 75 | 202.159,97 | 72,2 | 27,8 |
| 100 | 334.074,01 | 70,0 | 30,0 | 100 | 178.858,08 | 63,8 | 36,2 |

Tabela 10: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Jaguari e UHE Funil no período de 1993 a 2001

| VMO (%) | Jaguari | | | VMO (%) | Funil | | |
|------------|--------------------|--------------|-----------|------------|--------------------|--------------|-----------|
| | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) | | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) |
| 0 | 125.676,99 | 100 | 0 | 0 | 1.061.895,38 | 100 | 0 |
| 25 | 116.888,00 | 93,0 | 7,0 | 25 | 978.395,32 | 92,1 | 7,9 |
| 50 | 108.114,43 | 86,0 | 14,0 | 50 | 896.693,38 | 84,4 | 15,6 |
| 75 | 99.356,34 | 79,1 | 20,9 | 75 | 818.823,99 | 77,1 | 22,9 |
| 100 | 90.613,78 | 72,1 | 27,9 | 100 | 639.233,55 | 60,2 | 39,8 |

Da mesma forma, a Tabela 11 apresenta a geração de energia e suas reduções, porém para o conjunto de usinas hidrelétricas (Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil). Tais dados, podem ser melhor visualizados com os Gráficos 1 e 2, que apresentam respectivamente a produção e a redução de energia por cenário e o quantitativo da geração de energia.

Tabela 11: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1993 a 2001

| VMO (%) | Cascata de 4 UHE no Paraíba do Sul | | |
|------------|------------------------------------|--------------|-----------|
| | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) |
| 0 | 1.944.701,78 | 100 | 0 |
| 25 | 1.787.735,49 | 91,93 | 8,07 |
| 50 | 1.639.147,11 | 84,29 | 15,71 |
| 75 | 1.490.957,56 | 76,67 | 23,33 |
| 100 | 1.242.779,42 | 63,91 | 36,09 |

Gráfico 1: Cenários de produção e redução percentual de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1993 a 2001

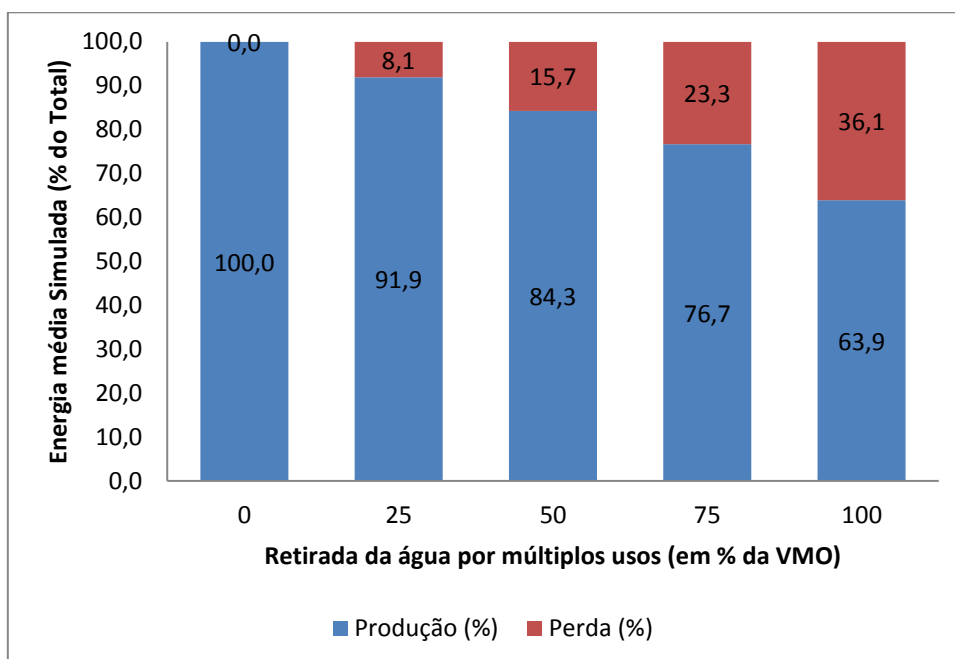
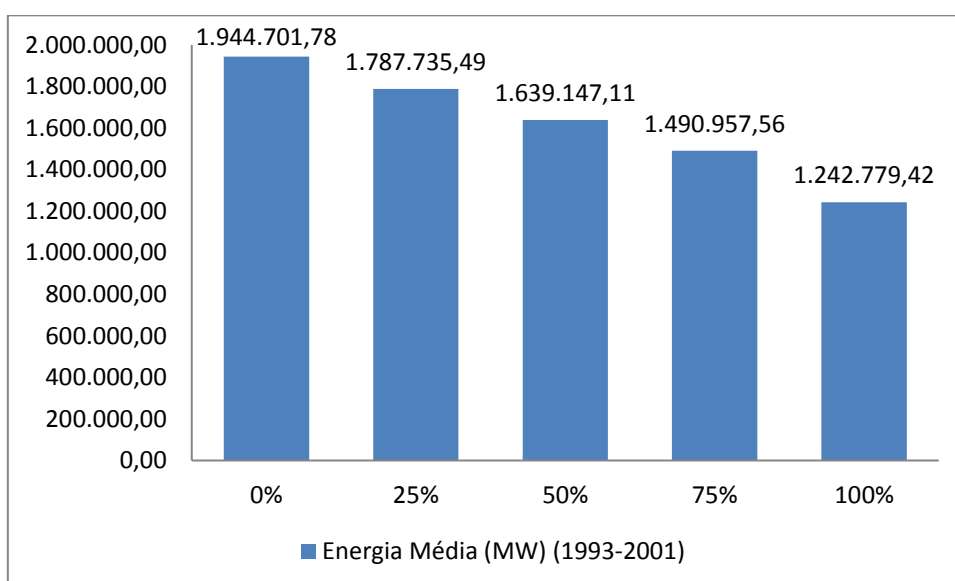


Gráfico 2: Cenários de geração de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1993 a 2001



Conforme pode-se observar nos gráficos, a produção de energia diminui com o aumento dos usos consuntivos, o que indica uma menor disponibilidade hídrica a montante das usinas. A variação na redução de energia nos cenários de usos consuntivos da água foi de 8,1% a 36,1%.

Quanto a situação da demanda por água em relação a VMO pelos principais usuários de recursos hídricos destacados neste estudo (abastecimento humano e saneamento, abastecimento industrial e setor agrícola) nos pontos de localização das usinas hidrelétricas, utilizou-se os valores de demanda hídrica da Tabela 1 para calcular a porcentagem de utilização da VMO obtida no período de 1993 a 2001 demonstrado na Tabela 7. Os valores percentuais da VMO nos pontos das usinas hidrelétricas obedeceram as demandas dos respectivos estados em que situam, onde as usinas de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari correspondem a demanda de São Paulo e a usina de Funil a demanda de água no estado do Rio de Janeiro. Assim surge, os resultados da Tabela 12 abaixo.

Tabela 12: Percentual da demanda hídrica dos usos consuntivos, próximos aos empreendimentos hidrelétricos, em relação a Vazão Máxima Outorgável (VMO) no período de 1993 a 2001

| Usos consuntivos | % da VMO | | | |
|--|---------------|------------------|---------------|--------------|
| | UHE Paraibuna | UHE Santa Branca | UHE Jaguari | UHE Funil |
| Abastecimento humano (urbano e rural) e saneamento (m ³ /s) | 37,36 | 29,10 | 113,77 | 9,99 |
| Abastecimento industrial (m ³ /s) | 21,88 | 17,04 | 66,62 | 15,17 |
| Setor Agrícola (m ³ /s) | 19,02 | 14,82 | 57,92 | 31,49 |
| Somatório (%): | 78,25 | 60,96 | 238,31 | 56,64 |

Da Tabela 12, percebe-se que entre os municípios de Paraibuna e Santa Branca o total de demanda permeia o cenário de 50% a 75% da VMO com redução da geração de energia entre 15 e 24%. Na usina de Jaguari, que permeia os municípios de Jacareí e São José dos Campos, o valor da VMO foi ultrapassado mais que o dobro, o que simboliza que neste ponto o uso dos recursos hídricos está sendo fortemente pressionado. Na usina de Funil localizada no município de Itatiaia (RJ) a redução na variação de energia está situada em aproximadamente 17%. No caso do município de Jacareí a São José dos Campos, recomenda-se que concessões de outorgas sejam revistas e que desperdícios de

água sejam investigados, pois mesmo que se priorize o abastecimento humano como preconiza a Lei da Águas, Lei Federal 9.433/97, a VMO continua sendo ultrapassada para abastecimento humano.

A segunda simulação ocorreu com o período de dados de 1999 a 2010, onde pode-se obter cinco cenários.

- Cenário 2.1: Sem usos consuntivos (0% da VMO).
- Cenário 2.2: Com usos consuntivos a partir de 25% da VMO.
- Cenário 2.3: Com usos consuntivos a partir de 50% da VMO.
- Cenário 2.4: Com usos consuntivos a partir de 75% da VMO.
- Cenário 2.5: Com usos consuntivos a partir de 100% da VMO.

As Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os resultados dos cenários para cada usina hidrelétrica e a Tabela 15 refere-se a cascata de empreendimentos hidrelétricos (Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil).

Tabela 13: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Paraibuna e UHE Santa Branca no período de 1999 a 2010

| VMO (%) | Paraibuna | | | VMO (%) | Santa Branca | | |
|------------|--------------------|--------------|-----------|------------|--------------------|--------------|-----------|
| | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) | | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) |
| 0 | 399.338,76 | 100 | 0 | 0 | 233.971,69 | 100 | 0 |
| 25 | 369.483,60 | 92,5 | 7,5 | 25 | 213.647,28 | 91,3 | 8,7 |
| 50 | 339.655,78 | 85,1 | 14,9 | 50 | 193.610,64 | 82,7 | 17,3 |
| 75 | 309.855,20 | 77,6 | 22,4 | 75 | 174.249,04 | 74,5 | 25,5 |
| 100 | 280.082,03 | 70,1 | 29,9 | 100 | 152.646,11 | 65,2 | 34,8 |

Tabela 14: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a UHE Jaguari e UHE Funil no período de 1999 a 2010

| VMO (%) | Jaguari | | | VMO (%) | Funil | | |
|------------|--------------------|--------------|-----------|------------|--------------------|--------------|-----------|
| | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) | | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) |
| 0 | 106.560,67 | 100 | 0 | 0 | 991.013,60 | 100 | 0 |
| 25 | 97.728,80 | 91,7 | 8,3 | 25 | 907.168,92 | 91,5 | 8,5 |
| 50 | 90.316,56 | 84,8 | 15,2 | 50 | 842.934,06 | 85,1 | 14,9 |
| 75 | 82.914,10 | 77,8 | 22,2 | 75 | 776.653,91 | 78,4 | 21,6 |
| 100 | 75.520,78 | 70,9 | 29,1 | 100 | 672.895,35 | 67,9 | 32,1 |

Tabela 15: Cenários de produção de energia e reduções associadas aos usos consuntivos para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1999 a 2010

| VMO (%) | Cascata de 4 UHE no Paraíba do Sul | | |
|---------|------------------------------------|--------------|-----------|
| | Energia Média (MW) | Produção (%) | Perda (%) |
| 0 | 1.730.884,72 | 100 | 0 |
| 25 | 1.588.028,60 | 91,7 | 8,3 |
| 50 | 1.466.517,04 | 84,7 | 15,3 |
| 75 | 1.343.672,25 | 77,6 | 22,4 |
| 100 | 1.181.144,27 | 68,2 | 31,8 |

O gráfico 3 ilustra a diminuição na geração de energia à medida que se aumenta a porcentagem de uso da água e o Gráfico 4 apresenta o decaimento quantitativo da produção de energia.

Gráfico 3: Cenários de produção e redução percentual de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1999 a 2010

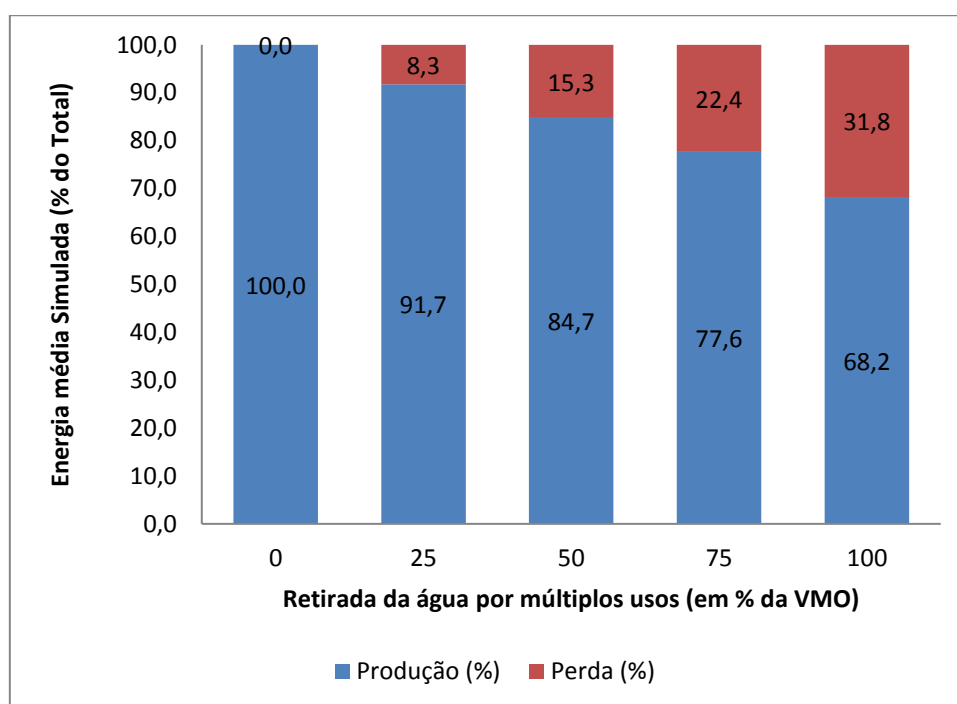
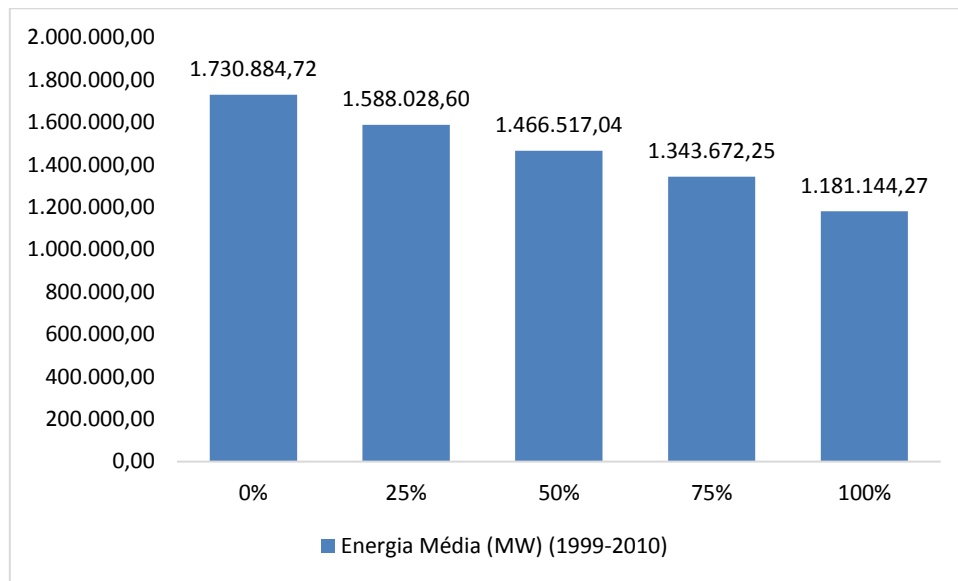


Gráfico 4: Cenários de geração de energia para a cascata de usinas hidrelétricas no rio Paraíba do Sul no período de 1999 a 2010



No período de 1999 a 2010 a redução de energia foi de 8,3% a 31,8% com a produção de energia em 1.730.885MW no caso do cenário sem uso consuntivo da água e em 1.181.144MW para o cenário com o uso total da VMO.

Quanto a situação da demanda por água em relação a VMO pelos principais usuários de recursos hídricos (abastecimento humano e saneamento, abastecimento industrial e setor agrícola) nos pontos de localização das usinas hidrelétricas, utilizou-se os valores de demanda hídrica da Tabela 1 para calcular a porcentagem de utilização da VMO obtida no período de 1999 a 2010 demonstrado na Tabela 8. Os valores percentuais da VMO nos pontos das usinas hidrelétricas obedeceram as demandas dos respectivos estados em que situam, onde as usinas de Paraibuna, Santa Branca e Jaguari correspondem a demanda de São Paulo e a usina de Funil a demanda de água no estado do Rio de Janeiro. Assim surge, os resultados da Tabela 16 abaixo.

Tabela 16: Percentual da demanda hídrica dos usos consuntivos, próximos aos empreendimentos hidrelétricos, em relação a Vazão Máxima Outorgável (VMO) no período de 1999 a 2010

| Usos consuntivos | % da VMO | | | |
|--|---------------|------------------|---------------|--------------|
| | UHE Paraibuna | UHE Santa Branca | UHE Jaguari | UHE Funil |
| Abastecimento humano (urbano e rural) e saneamento (m ³ /s) | 43,15 | 35,25 | 125,14 | 11,43 |
| Abastecimento industrial (m ³ /s) | 25,27 | 20,64 | 73,29 | 17,36 |
| Setor Agrícola (m ³ /s) | 21,97 | 17,95 | 63,71 | 36,04 |
| Somatório (%): | 90,39 | 73,84 | 262,14 | 64,82 |

Da Tabela 16, observa-se que entre os municípios de Paraibuna e Santa Branca (SP) o total de demanda hídrica aproxima-se dos cenários de 75% a 100% da VMO com redução da geração de energia entre 22 e 28% (o total da VMO não chega a ser atingido neste trecho). Na usina de Jaguari, que permeia os municípios de Jacareí e São José dos Campos (SP), o valor da VMO foi ultrapassado mais que o dobro, o que simboliza que neste ponto o uso dos recursos hídricos está sendo fortemente pressionado. Na usina de Funil localizada no município de Itatiaia (RJ) a redução na variação de energia está situada em aproximadamente 19%. No caso do município de Jacareí a São José dos Campos, recomenda-se que concessões de outorgas sejam revistas e que desperdícios de água sejam investigados, pois mesmo que se priorize o abastecimento humano como preconiza a Lei das Águas, Lei Federal 9.433/97, a VMO continua sendo ultrapassada para abastecimento humano.

A comparação dos cenários de produção de energia entre os dois períodos, 1993 a 2001 e 1999 a 2010, apresentaram porcentagens de redução na geração de energia de 34%, na média, do cenário com o uso total da VMO (100%).

No entanto, os Decretos de nº 24.643, de 10 de julho de 1934 (código das águas), em seu art. 154, e o de nº 41.019, de 26 de fevereiro de 1957 em seu art. 105, regulamentam

que as reservas de água e de energia não poderão privar a usina hidrelétrica de mais do que 30% da energia de que ela disponha. Ou seja, por estas legislações a disponibilidade hídrica total no rio Paraíba do Sul (100% VMO, onde $VMO = 70\% Q_{95\%}$) para os múltiplos usuários de água não poderia ser atingida, pois compromete mais de 30% da geração de energia. Desta forma, os usuários, que poderiam ter acesso a água, deixariam de ser contemplados e o direito de todos ao uso da água preconizado pela Lei Federal nº 9.433/97 seria infringido.

De acordo com estes decretos, o total da disponibilidade hídrica no município de Paraibuna, no período de 1999-2010, não chegaria a ser atingido, pois o comprometimento máximo da geração de energia chegaria com o uso de 94,34% da VMO e a introdução de novos usuários no rio seria impedida.

Segundo AGEVAP (2013) ao realizar o balanço hídrico quantitativo na bacia do rio Paraíba do sul, algumas regiões da bacia possuem dificuldades de atendimento da demanda hídrica, visto que algumas atividades realizam forte pressão sobre os recursos hídricos como é o caso no Vale do Paraíba em São Paulo, entre as cidades de Jacareí e Lorena. Isto por sua vez, reforça o resultado encontrado no município de Jacareí (UHE Jaguari), Tabelas 12 e 16, com um conflito de uso e demanda pela água, constatado a partir do percentual da VMO.

A presença de incremental negativa na série de dados impossibilitou o programa de trabalhar com um período de dados maior e mais recente após a verificação da confiabilidade dos resultados do software (2ª simulação – 1999-2010). Esta condição não permitiu que o sistema computacional alcançasse o seu critério de parada, gerando uma não convergência e uma parada forçada do algoritmo.

Lembrando que a incremental negativa configura uma inconsistência dos dados. Pois, a vazão natural não engloba ações antrópicas no rio, no entanto, a vazão afluente que conceitualmente permite a retirada de água por atividades humanas, apresentou-se maior que a vazão natural.

Sendo assim, a inviabilidade de se trabalhar com um período mais recente, impossibilitou a verificação deste estudo quanto ao quadro situacional da geração de energia durante e após a crise hídrica que ocorreu nos anos de 2014-2015. Este evento foi considerado a pior seca do rio Paraíba do Sul nos últimos 85 anos (ANA, 2015).

CAPÍTULO 6

VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicabilidade do modelo SisUCA foi avaliada a partir da comparação dos resultados de geração de energia com o trabalho de Hora (2003) para os mesmos empreendimentos hidrelétricos constantes no escopo deste estudo: UHE Paraibuna, UHE Santa Branca, UHE Jaguari e UHE Funil. Apesar do trabalho de Hora (2003) utilizar a série de dados de vazões afluentes e o SisUCA ter utilizado a série de vazões naturais para o conjunto de empreendimentos hidrelétricos com reservatório de regularização, a diferença de geração de energia foi inferior a 10%.

Ambos os estudos tiveram o objetivo de otimizar a disponibilização de água na bacia, de modo que o atendimento da demanda ocorresse prioritariamente na bacia em que estão contidos. Isto contrapõe a forma atual de operação do ONS, que visa o atendimento a demanda energética do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A formulação de cenários de usos consuntivos de água a partir de percentis da Vazão Máxima Outorgável (VMO) no período de 1993-2001 indicou uma variação de perda de energia de 8% a 36% para a cascata de usinas hidrelétricas. Resultado semelhante ocorreu para o período de 1999-2010, com uma redução na geração de energia chegando a 31% no cenário com o uso total do valor da VMO (100%).

O cenário com uso de 100% da VMO foi computado devido a possibilidade legal que os usos múltiplos possuem de usufruto da água. Na ocorrência deste caso, mais de 30% da energia naturalmente disponível no rio Paraíba do Sul deixaria de ser gerada. Este percentual foi obtido a partir dos dados de entrada no SisUCA com a série de vazões naturais do rio Paraíba do Sul e as características de operação das usinas hidrelétricas.

No entanto, o cenário com 100% da VMO entra em conflito com os Decretos nº 24.643/34 e nº 41.019/57, que regulamentam que 30% ou mais da geração de energia não pode ser comprometida por outros usos da água. Por sua vez, o município de Paraibuna, com o uso de 90,4% da VMO no período de 1999-2010, está próximo de enfrentar este conflito legislativo e de gestão hídrica para a introdução de novos usuários na bacia ou a preservação do percentual de geração de energia.

Este conflito ocorre devido a declaração de reserva de disponibilidade hídrica (DRDH), concedida como outorga as hidrelétricas, não computar em sua projeção de demanda hídrica dos usuários de água o valor da vazão máxima outorgável (VMO) ao longo do tempo de vida da usina.

Do município de Jacareí a São José dos Campos (SP), que abrange a UHE Jaguari, foi constatado a superação de 100% da VMO. Neste caso, os recursos hídricos estão sobre forte pressão a demanda hídrica, comprometendo o equilíbrio aquático do rio Paraíba do Sul, neste trecho em específico. Sendo assim, sugere-se que a Agência Nacional de Água revise as outorgas concedidas, investigue a ocorrência de desperdício de água, adote campanhas de economia de água, de modo que o consumo de água retorne a ser inferior que 100% da VMO.

No município de Itatiaia (RJ), que engloba a UHE Funil a demanda hídrica total dos usos consuntivos de abastecimento humano e saneamento, abastecimento industrial e setor agrícola está em 65% da VMO, o que repercute numa redução de geração de energia em 19%. Este trecho possui uma situação favorável para novas concessões de outorgas de água. Por outro lado, a região de Santa Branca (SP) está com 74% da VMO, onde a emissão de outorgas não seria impedida, porém indica-se que sejam realizadas com cautela.

A energia média gerada na calha do rio Paraíba do sul, período 1999-2010, para o cenário sem usos consuntivos foi de 1.730.885 MW e para o cenário que utiliza 100% da VMO foi de 1.181.144 MW. Nisto, observa-se a tendência de que o atendimento crescente de vazões para usos consuntivos implica diretamente na redução da produção de energia. Neste quesito, é importante que o concessionário de energia tenha a real noção se o seu empreendimento pode a vir, no futuro, a ter dificuldades de atendimento à demanda de energia contratada, para isso é necessário a incorporação da vazão máxima outorgável (VMO) durante o cálculo das projeções de demanda hídrica pelos usuários de bacia.

Sobre um contraponto desde estudo, foi quanto a consistência dos dados de entrada (vazão). Durante a análise de continuidade da série de vazões naturais e afluentes foram encontrados casos de incrementais negativas e é importante destacar que na natureza não existe a ocorrência de vazão negativa nem mesmo conceitualmente.

Para o trecho entre a UHE Paraibuna e UHE Santa Branca, 144 meses de vazão afluente foram analisados. Dos 144, 69 apresentaram valores de vazão afluente com incremental negativa, ou seja, a vazão a montante de Santa Branca era menor que a vazão a jusante de Paraibuna, indicando uma perda não natural da água neste trecho. O trecho de Santa Branca+Jaguari até Funil apresentou ausência de incrementais negativos.

Quanto a análise da série da vazão natural não houve a presença de incrementais negativos. No entanto, ao comparar os valores da vazão natural com a vazão afluente, foram encontrados 26 casos de incremental negativa, ou seja, foi verificado casos em que a vazão afluente era maior que a vazão natural. Este quadro, portanto, tornou-se preocupante, pois é naturalmente impossível uma vazão que conceitualmente admita usos antrópicos da água (vazão afluente) ser maior que a vazão que conceitualmente só admite o fluxo natural do rio sem interferências externas (vazão natural).

Conseqüentemente, este estudo ficou impossibilitado de trabalhar com períodos mais recentes de vazão, já que os dados de vazão subdimensionados provocaram no software uma não convergência e uma parada forçada no algoritmo, de modo que o mesmo não alcançou o seu critério de parada. Ou seja, o software ao encontrar valores negativos, exerce uma parada forçada, já que não existe vazão negativa. A presença de vazão negativa como dado de entrada configura um erro, pois o software SisUCA não pode realizar simulações com o que não existe.

A segunda dificuldade deste estudo ainda engloba o período de abordagem processado no software. O fato dos dados de geração de energia terem ido até o ano de 2010, impossibilitou a verificação do quadro situacional da geração de energia durante e após a crise hídrica que ocorreu nos anos de 2014-2015. Este evento foi considerado a pior seca do rio Paraíba do Sul nos últimos 85 anos.

Quanto a aplicabilidade do software como uma ferramenta de gestão de recursos hídricos, o mesmo apresentou-se eficiente, porém limitado a qualidade dos dados de entrada. De modo que, o funcionamento do programa cumpre com seus objetivos, mas os dados de entrada de vazão necessitam ser reformulados. Por isso, recomenda-se uma reanálise pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) das vazões naturais dimensionadas e publicadas ao público em geral.

O software também se apresentou de fácil manuseio e de curto processamento, com uma estimativa de tempo de processamento de menos de 2 minutos para a cascata de empreendimentos. O programa ainda possui a vantagem de ser gratuito e de acesso público. Assim sendo, recomenda-se a aplicação do SisUCA em outras bacias hidrográficas brasileiras que já possuam séries de vazões naturais aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **Light Energia.** Disponível em: <<http://www.light.com.br/grupo-light/Empresas-do-Grupo/light-energia.aspx>>. Acesso em novembro de 2017.

_____. **UHE Jaguari vista do alto.** Disponível em: <<http://www.sbbengenharia.com.br/index.php/regiao-sudeste/93:uhe-paraibuna-paraitinga>>. Acesso em: 04 nov 2018.

_____. **Dados Característicos – UHE Jaguari.** Disponível em: <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaJaguari_Dados?OpenDocument>. Acesso em: 25 jun 2018.

_____. **Dados da Bacia do Rio Paraíba do Sul.** Disponível em: <<http://gripbsul.ana.gov.br/ABacia.html>>. Acesso em janeiro de 2018.

_____. **Usina Hidrelétrica Jaguari.** Disponível em: <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaJaguari?OpenDocument> . Acesso em: 03 nov 2018.

_____. **Usina Hidrelétrica Paraibuna.** Disponível em: <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaParaibuna?OpenDocument>. Acesso em: 03 nov 2018.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Avaliação dos Impactos de Novas Transposições de Vazão no Rio Paraíba do Sul - R4: Demandas de Uso da Água Consuntivos e Não Consuntivos.** 2013. 96 p.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Relatório Técnico - Bacia do Rio Paraíba do Sul – Subsídios às ações de Melhoria da gestão.** 2011. 256 p. Disponível em: <<http://www.agevap.org.br/downloads/Relatorio%20Geral%20versao%20para%20site%2029dez11.pdf>>; Acesso em: 10 maio 2018.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de Ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes - Diagnóstico Integrado e Contextualizado dos Recursos Hídricos.** AGEVAP – CONTRATO nº 21/2012. Dez. 2013. 149 p.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo. Relatório Contratual - R-10.** AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Dez 2007. 147 p. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/downloads/PSR-RE-012-R1.pdf>> . Acesso em: 21 junho 2018.

ANA. 2015. **Plano de Ações Complementares para a Gestão da Crise Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul.** Versão 2,0. Disponível em:

<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/paraiba-do-sul/documentos-relacionados>. Acesso em: 09 jan 2019

ANA. Agência Nacional de Água. **Plano de Recursos Hídricos para a Fase Inicial da Cobrança na Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Diagnóstico da Situação Atual dos Recursos Hídricos. PGRH-RE-010-R0. V.1. p. 243, fev. 2002.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2001. **Bacia do Rio Paraíba do Sul - Livro da Bacia**. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2001/BaciadoRioParaibadoSul.pdf>>. Acesso em: 21 junho de 2018.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2017. **Conjuntura de Recursos Hídricos 2017**. Brasília, DF.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Águas Brasil**. Informativo da Agência Nacional de Águas nº8. Set-Out 2008.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Sala da Situação – Paraíba do Sul**. Disponível em: < <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/paraiba-do-sul/paraiba-do-sul-saiba-mais>>. Acesso em: 09 jan 2019

BAJAY e et al. **Avaliação da Atual Metodologia de Cálculo da Energia Assegurada de Usinas Hidrelétricas**. PCH notícias e shop News. Revista nº 36, ano 9. Jan/Fev/Mar 2008. Disponível em: <<https://cerpch.unifei.edu.br/wp-content/uploads/revistas/revista-36.pdf#page=24>>. Acesso em: 28 set 2018.

BRANCHE, E. **The multipurpose water uses of hydropower reservoir: The SHARE concept**. Comptes Rendus Physique, vol. 18, Issues 7–8, September–October 2017, Pages 469-478. Doi: 10.1016/j.crhy.2017.06.001.

CARVALHO. **Consumo e perda de água potável na região metropolitana do Rio de Janeiro**. Revista Produção e Desenvolvimento, v.1, n.3, p.80-89. 2015

CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Relatório técnico sobre a situação dos reservatórios com subsídios para ações de melhoria da gestão na bacia do rio Paraíba do Sul**. 2010. 184 p. Disponível em: <www.ceivap.org.br/downloads2011/4-Rel2010SituRes.pdf>. Acesso em: 10 maio 2018.

CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Organismos de bacia**. Disponível em: <<http://sigaceivap.org.br/observatorioComite>> Acesso em: 25 jan 2019

CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Observatório. **Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Disponível em: < <http://sigaceivap.org.br/observatorioEstado>>. Acesso em: 10 maio 2018.

CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo – Apresentação**. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/newave-modelo-de>>

planejamento-da-operacao-de-sistemas-hidrotermicos-interligados-de-longo-e-medio-prazo.htm>.

CESP. Companhia Energética de São Paulo. **Dados Característicos – UHE Paraibuna**. Disponível em: <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaParaibuna_Dados?OpenDocument>. Acesso em: 25 jun 2019.

CHIAPPORI, D. V. **Avaliação da geração de energia elétrica na bacia do rio Piabanha em relação aos usos múltiplos crescentes da água**. Dissertação de mestrado (Mestre em ciências de engenharia civil). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2015. 179 p.

CPAMP. Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico. **Relatório de Validação da Versão 12 do Programa SUIISHI – Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas de Sistemas Hidrotérmicos Interligados – Modo de Simulação Hidrotérmica**. Relatório Técnico. Brasília, 2016, 25p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/4524024/Relat%C3%B3rio+de+Valida%C3%A7%C3%A3o++Programa+SUIISHI++21-12-2016+revis%C3%A3o.pdf/843d4b93-3b20-44ee-ba2a-c8b302e3424c>>.

DIÁRIO DE CANOAS. **UHE Santa Branca vista do alto**. Disponível em: <https://www.diariodecanoas.com.br/_conteudo/2015/01/noticias/pais/123248-sem-agua-segunda-hidreletrica-no-pais-para-de-gerar-energia.html>. Acesso em: 04 nov 2018.

ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de Metodologia. Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas**. Out 2009. 27p. Disponível em: <http://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/msui/Manual_Metodologia.pdf>. Acesso em: 23 set 2018.

ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas (MSUI)**. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Modelo-de-Simulacao-a-Usinas-Individualizadas.aspx>>.

FURNAS. Furnas Centrais Elétricas S.A. **Dados Técnicos – UHE Funil**. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funil.asp>. Acesso em: 25 jun 2018.

HORA, A. F. **O Setor Elétrico Brasileiro e sua Influência na Gestão dos Recursos Hídricos – Uma proposta para Outorga e Operação Hidráulica dos Aproveitamentos Hidrelétricos**. Tese apresentada ao concurso público de professor titular para a Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro. Abr 2003. 130 p.

HORA, M. A. G. M. **Compatibilização da geração de energia em aproveitamentos hidrelétricos com os demais usos dos recursos hídricos**. 2ª Edição. Niterói: EDUFF - Editora da Universidade Federal Fluminense, 2012. v. 1. 102p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas>>

novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>. Acesso em: 10 maio 2018

LIGHT. Light Serviços de Eletricidade S.A. **Dados – UHE Santa Branca**. Disponível em: <<http://www.light.com.br/grupo-light/Empresas-do-Grupo/light-energia.aspx>>. Acesso em: 25 jun 2018.

NUNES U. M et al. Sudeste rumo à desertificação: Rio Paraíba do Sul. **Revista Educação pública**. CEDERJ, Fundação CECIERJ. Rio de Janeiro. 4 ago 2015. ISSN: 1984-6290. Disponível em: <<http://educacaopublica.cederj.edu.br/revista/artigos/sudeste-rumo-a-desertificacao-rio-paraiba-do-sul>>. Acesso em: 22 maio 2018.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Atualização de Séries Históricas de Vazões – Período 1931 a 2006 – ONS RE-3/237/2007 R1**. Relatório. Rio de Janeiro: ONS, 2007.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sistema Interligado Nacional (SIN)**. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 26 jan 2019

SBB Engenharia. **UHE Paraibuna vista do alto**. Disponível em: <<http://www.sbbengenharia.com.br/index.php/regiao-sudeste/93:uhe-paraibuna-paraitinga>>. Acesso em: 04 nov 2018.

SOUZA. 2014. **A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil**. REDE - Revista Eletrônica do Prodem, v.8, n.1, p. 26-45, abr. 2014, Fortaleza, Brasil, ISSN: 1982-5528

STOLL, B.; ANDRADE, J.; COHEN, S.; BRINKMAN, G.; MARTINEZ-ANIDO, C. B. **Hydropower Modeling Challenges**. Technical Report NREL/TP-5D00-68231. National Renewable Energy Laboratory. April 2017. 29p. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68231.pdf>>.

VIII. ANEXOS

VIII.1. MANUAL DE USO DO SOFTWARE SisUCA

A entrada das usinas hidrelétricas no programa deverá ser feita de montante para a jusante de acordo com a topologia inerente ao conjunto de empreendimentos hidrelétricos. Sendo assim, digita-se o nome da usina e clica-se em “inserir”. Ao chegar no nome de usina que seja pertencente a um rio afluente, insere-se normalmente o seu nome, porém deve-se realizar o passo a mais de selecioná-la e clicar no botão “Tornar um afluente”. Desse modo, ao finalizar a inserção da sequência de empreendimentos a serem trabalhados clica-se no botão “ok”. Na necessidade de trabalhar com esta topologia mais de uma vez, é possível salvar a estrutura no campo “salvar” e no momento de abrir a janela inicial do programa (Figura 10) novamente pode-se clicar no campo “abrir” e posteriormente “ok”.

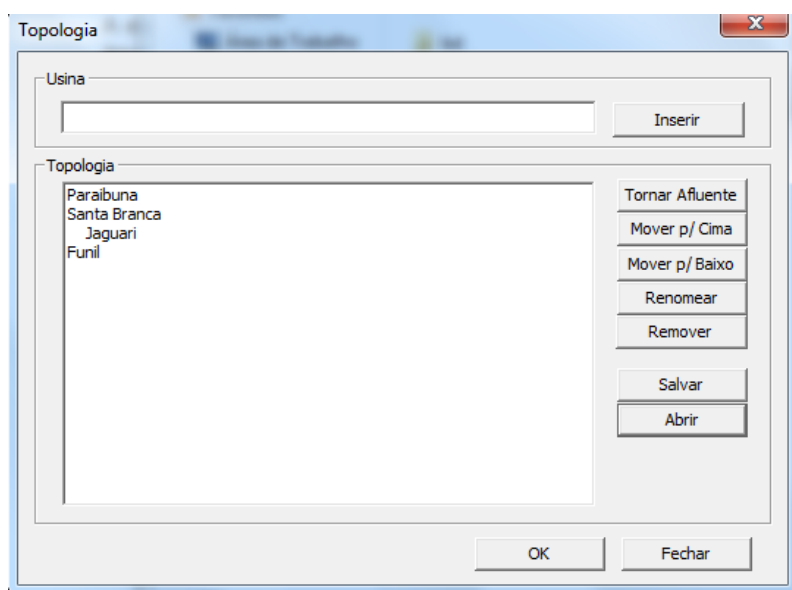


Figura 10: Layout inicial do software SisUCA

O software SisUCA ao passar para janela seguinte (Figura 11), conecta-se automaticamente ao banco nomeado como “dados_usinas2000.mdb”, o qual possibilitará a visualização dos dados. Caso os dados não sejam visualizados, deve-se clicar no ícone “importar” e buscar-se o caminho no qual o banco de dados foi salvo. Também se preciso for, os dados podem ser editados manualmente na própria plataforma do programa (Figura 11).

Entrada de dados

Usina: Rio:

Potência instalada: MW Engolimento Máximo: m³/s

Volume total: m³ Queda de referência: m

Volume morto: m³ Perda hidráulica: m

Volume útil: m³ Rendimento: % Taxa de Indisponibilidade: %

Volume útil p/ operação c/ engolimento máximo: % %

Coordenadas
 Lat:
 Long:

Curvas características

| | A0 | A1 | A2 | A3 | A4 |
|--------------------------|----------|---------|----------------|----------------|----------------|
| Vazão X NA jusante | 625.0 | | | | |
| Volume X NA reservatório | 662.4348 | 0.0224 | -0.00000440... | 0.000000000... | -2.8359E-14 |
| NA reservatório X Área | -1722.28 | 12.3779 | -0.0168791 | -0.000013775 | 0.000000025... |

Evaporação

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| mm/mês | | | | | | | | | | | | |

Figura 11: SisUCA – Preenchimento de dados de cada usina hidrelétrica

Em seguida, a terceira janela apresenta o período das séries de vazões naturais que se deseja simular, que no presente estudo foi adotado como de janeiro de 1993 a dezembro de 2001 e posteriormente, janeiro de 1999 a dezembro de 2010. Em seguida, na mesma janela devem preenchidos os espaços referentes a inexistência ou existência de usos consuntivos a partir de percentis da VMO, Figura 12.

Entrada de dados

Início
 Mês Ano

Fim
 Mês Ano

VMO m³/s

No estirão do montante existem usos?
 Sim Usos em relação a VMO %
 Não

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1999 | 134.0 | 131.0 | 92.0 | 73.0 | 51.0 | 56.0 | 46.0 | 32.0 | 41.0 | 36.0 | 40.0 | 58.0 |
| 2000 | 128.0 | 104.0 | 90.0 | 75.0 | 46.0 | 40.0 | 40.0 | 41.0 | 56.0 | 37.0 | 69.0 | 93.0 |
| 2001 | 77.0 | 97.0 | 74.0 | 47.0 | 47.0 | 34.0 | 37.0 | 35.0 | 45.0 | 48.0 | 41.0 | 65.0 |
| 2002 | 111.0 | 114.0 | 66.0 | 50.0 | 47.0 | 40.0 | 38.0 | 34.0 | 34.0 | 25.0 | 59.0 | 85.0 |
| 2003 | 98.0 | 60.0 | 66.0 | 42.0 | 33.0 | 28.0 | 28.0 | 26.0 | 26.0 | 45.0 | 45.0 | 46.0 |
| 2004 | 76.0 | 102.0 | 75.0 | 76.0 | 57.0 | 62.0 | 61.0 | 39.0 | 32.0 | 43.0 | 48.0 | 58.0 |
| 2005 | 120.0 | 99.0 | 74.0 | 117.0 | 74.0 | 51.0 | 48.0 | 36.0 | 51.0 | 57.0 | 65.0 | 77.0 |
| 2006 | 68.0 | 132.0 | 75.0 | 57.0 | 46.0 | 40.0 | 38.0 | 30.0 | 35.0 | 42.0 | 76.0 | 100.0 |
| 2007 | 105.0 | 69.0 | 49.0 | 42.0 | 41.0 | 37.0 | 50.0 | 28.0 | 21.0 | 43.0 | 65.0 | 52.0 |
| 2008 | 61.0 | 120.0 | 99.0 | 98.0 | 59.0 | 52.0 | 34.0 | 43.0 | 36.0 | 51.0 | 80.0 | 88.0 |
| 2009 | 107.0 | 138.0 | 97.0 | 78.0 | 56.0 | 50.0 | 63.0 | 49.0 | 51.0 | 92.0 | 76.0 | 192.0 |

Figura 12: Visualização das vazões naturais no software SisUCA

No término das informações da última usina da cascata, o botão “avançar” passa a estar nomeado como “concluir”, quando ocorrerá o salvamento dos dados (Figura 13).

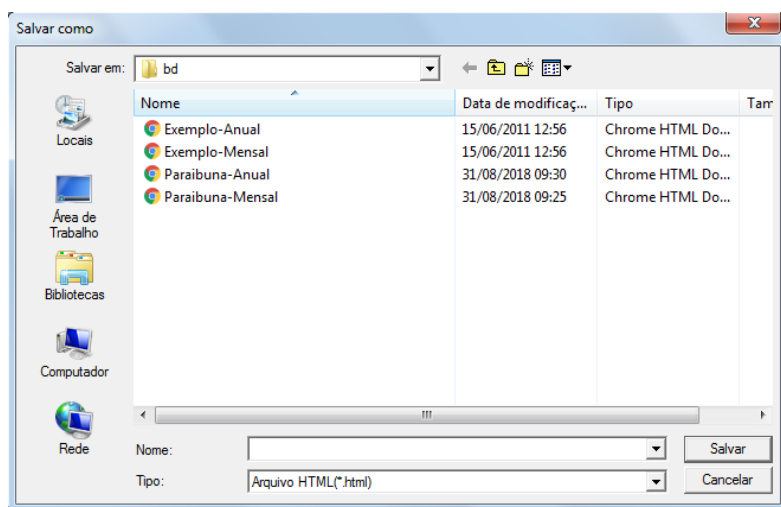


Figura 13: Tela para salvar os dados resultantes da simulação do software

Os dados salvos são armazenados no formato “*html*” e aparecem com o layout apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Layout do resultado de simulação de dados sem usos consuntivos para a usina hidrelétrica de Paraibuna

Paraibuna

Total de meses de simulação: 144

| | | | |
|--------------------------------------|---------------|---|---------------|
| Potência instalada (MW): | 86,0 | Queda de referência (m): | 87,0 |
| Volume total (m ³): | 4732000000,00 | Volume morto (m ³): | 2096000000,00 |
| Volume útil total (m ³): | 2636000000,00 | Engolimento máximo (m ³ /s): | 136,00 |
| Perda hidráulica (m ³): | 2,16 | | |
| Vazão MLT (m ³ /s): | 65,81 | Vazão regularizada (m ³ /s): | 66,91610000 |
| VMO (m ³ /s): | 20,33 | Redução VMO (% /100): | 0,00 |

| ANO | QAFLU (m ³ /s) | QDEFLL (m ³ /s) | VOL.ÚTIL (m ³) | NAres (m) | QUEDA (m) | ENERGIA (MWano) |
|------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| 1999 | 65,83 | 72,67 | 90,44 | 712,48 | 85,32 | 475198,67 |
| 2000 | 68,25 | 66,92 | 84,50 | 711,55 | 84,39 | 432217,25 |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|
| 2001 | 53,92 | 66,92 | 75,47 | 710,08 | 82,92 | 424674,03 |
| 2002 | 58,58 | 66,92 | 64,30 | 708,19 | 81,03 | 414980,66 |
| 2003 | 45,25 | 66,92 | 44,70 | 704,58 | 77,42 | 396492,83 |
| 2004 | 60,75 | 66,92 | 29,77 | 701,62 | 74,46 | 381319,54 |
| 2005 | 72,42 | 66,92 | 30,62 | 701,80 | 74,64 | 382288,49 |
| 2006 | 61,58 | 66,92 | 26,85 | 700,98 | 73,82 | 378051,07 |
| 2007 | 50,17 | 66,92 | 14,10 | 698,05 | 70,89 | 363041,99 |
| 2008 | 68,42 | 66,92 | 5,81 | 696,06 | 68,90 | 352870,08 |
| 2009 | 87,42 | 66,92 | 15,88 | 698,52 | 71,36 | 365470,81 |
| 2010 | 97,08 | 66,92 | 61,72 | 707,75 | 80,59 | 412719,43 |
| Energia Média do Período (MWano): | | | | | | 398277,07 |

Além de dados numéricos, o resultado da simulação pode ser visto graficamente no próprio programa. A visualização gráfica ocorre automaticamente após o salvamento dos dados.

Por sua vez, a Figura 14 e Figura 15 representam o layout gráfico do software para a conjunto de empreendimentos hidrelétricos. No entanto, a mesma visualização cabe para as usinas individualmente. No item “variável”, pode-se selecionar o tipo de informação que se deseja visualizar como vazão afluente, vazão defluente, vazão vertida, vazão turbinada e energia gerada para um espaço máximo de visualização de 20 anos. Sendo assim, a Figura 14 apresenta dados de vazão afluente da cascata de empreendimentos e a Figura 15 apresenta informações de energia gerada, ambos nos anos de 1999 a 2010. A continuidade dos anos é editável no campo “ano”.

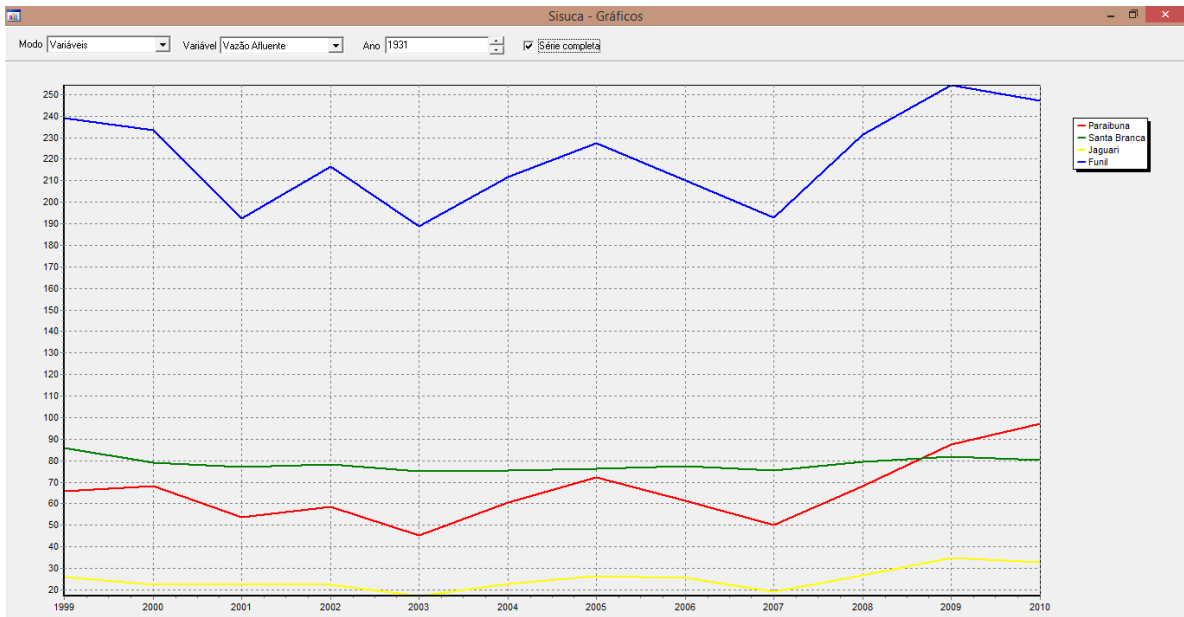


Figura 14: Vazão afluente das usinas Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil (1999-2010)

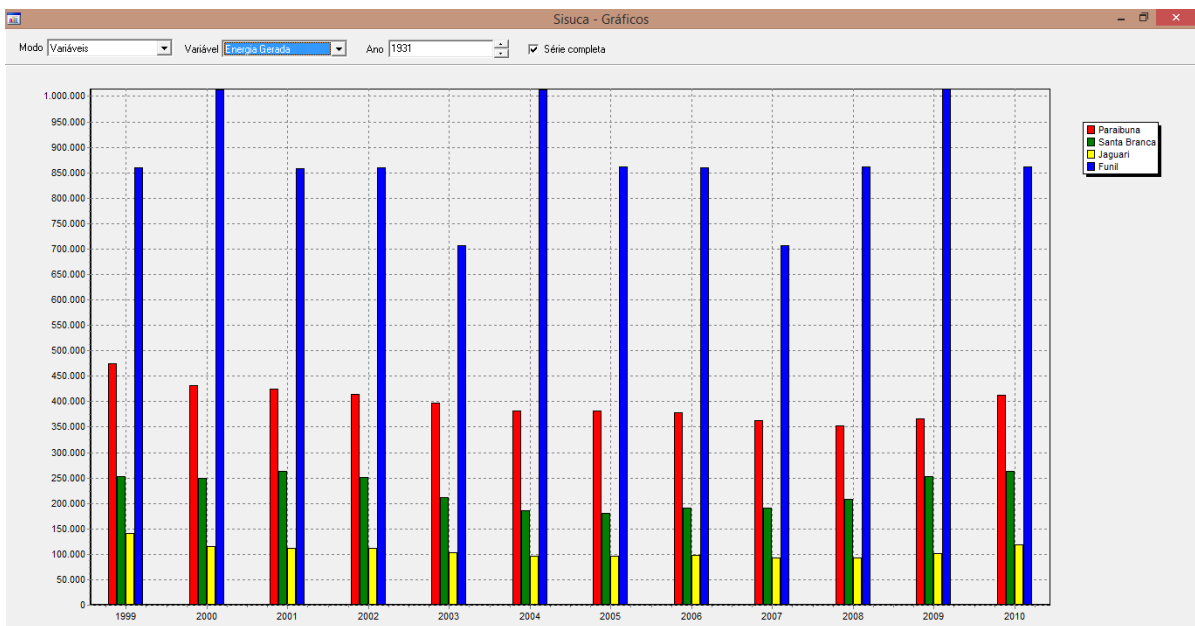


Figura 15: Energia gerada das usinas Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil (1999-2010)

VIII.2. VAZÃO NATURAL

A seguir consta o histórico de vazão natural no período de 1993-2010 de cada aproveitamento hidrelétrico presente no escopo deste estudo (Tabelas 18 a 21).

Tabela 18: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Paraibuna. Fonte: ONS (2018).

| Usina Hidrelétrica de Paraibuna | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 1993 | 71 | 116 | 113 | 73 | 51 | 55 | 41 | 35 | 61 | 53 | 29 | 44 |
| 1994 | 63 | 81 | 103 | 81 | 61 | 51 | 44 | 30 | 31 | 39 | 51 | 70 |
| 1995 | 75 | 205 | 98 | 65 | 59 | 50 | 52 | 42 | 39 | 88 | 71 | 75 |
| 1996 | 148 | 268 | 210 | 116 | 89 | 69 | 60 | 54 | 78 | 60 | 72 | 86 |
| 1997 | 134 | 74 | 66 | 58 | 51 | 57 | 43 | 35 | 46 | 49 | 75 | 65 |
| 1998 | 93 | 115 | 94 | 62 | 61 | 41 | 35 | 33 | 54 | 76 | 53 | 59 |
| 1999 | 134 | 131 | 92 | 73 | 51 | 56 | 46 | 32 | 41 | 36 | 40 | 58 |
| 2000 | 128 | 104 | 90 | 75 | 46 | 40 | 40 | 41 | 56 | 37 | 69 | 93 |
| 2001 | 77 | 97 | 74 | 47 | 47 | 34 | 37 | 35 | 45 | 48 | 41 | 65 |
| 2002 | 111 | 114 | 66 | 50 | 47 | 40 | 38 | 34 | 34 | 25 | 59 | 85 |
| 2003 | 98 | 60 | 66 | 42 | 33 | 28 | 28 | 26 | 26 | 45 | 45 | 46 |
| 2004 | 76 | 102 | 75 | 76 | 57 | 62 | 61 | 39 | 32 | 43 | 48 | 58 |
| 2005 | 120 | 99 | 74 | 117 | 74 | 51 | 48 | 36 | 51 | 57 | 65 | 77 |
| 2006 | 68 | 132 | 75 | 57 | 46 | 40 | 38 | 30 | 35 | 42 | 76 | 100 |
| 2007 | 105 | 69 | 49 | 42 | 41 | 37 | 50 | 28 | 21 | 43 | 65 | 52 |
| 2008 | 61 | 120 | 99 | 98 | 59 | 52 | 34 | 43 | 36 | 51 | 80 | 88 |
| 2009 | 107 | 138 | 97 | 78 | 56 | 50 | 63 | 49 | 51 | 92 | 76 | 192 |
| 2010 | 262 | 122 | 140 | 131 | 74 | 61 | 72 | 45 | 44 | 48 | 54 | 112 |

Tabela 19: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Santa Branca. Fonte: ONS (2018).

| Usina Hidrelétrica de Santa Branca | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 1993 | 78 | 135 | 125 | 85 | 58 | 65 | 46 | 39 | 74 | 63 | 34 | 47 |
| 1994 | 69 | 92 | 112 | 92 | 70 | 56 | 48 | 37 | 38 | 47 | 58 | 79 |
| 1995 | 91 | 238 | 109 | 75 | 67 | 55 | 63 | 49 | 44 | 98 | 81 | 84 |
| 1996 | 185 | 298 | 248 | 136 | 104 | 80 | 68 | 61 | 88 | 69 | 80 | 100 |
| 1997 | 158 | 98 | 73 | 66 | 60 | 71 | 51 | 44 | 58 | 63 | 92 | 76 |
| 1998 | 106 | 136 | 107 | 71 | 101 | 61 | 51 | 49 | 69 | 95 | 63 | 73 |
| 1999 | 158 | 156 | 106 | 84 | 59 | 64 | 53 | 43 | 53 | 51 | 54 | 68 |
| 2000 | 145 | 118 | 97 | 89 | 56 | 49 | 55 | 53 | 69 | 44 | 82 | 106 |
| 2001 | 89 | 120 | 83 | 54 | 56 | 43 | 44 | 44 | 53 | 59 | 47 | 77 |
| 2002 | 139 | 138 | 80 | 61 | 58 | 48 | 45 | 38 | 42 | 26 | 69 | 94 |
| 2003 | 116 | 73 | 76 | 50 | 40 | 34 | 38 | 31 | 31 | 49 | 53 | 51 |
| 2004 | 85 | 115 | 82 | 83 | 66 | 74 | 69 | 44 | 37 | 51 | 55 | 69 |
| 2005 | 135 | 113 | 84 | 125 | 83 | 58 | 54 | 43 | 59 | 67 | 74 | 87 |
| 2006 | 81 | 159 | 91 | 68 | 52 | 45 | 43 | 34 | 39 | 48 | 88 | 116 |
| 2007 | 130 | 84 | 58 | 49 | 47 | 42 | 57 | 32 | 23 | 47 | 76 | 61 |
| 2008 | 74 | 145 | 123 | 116 | 70 | 60 | 40 | 49 | 40 | 58 | 93 | 105 |
| 2009 | 130 | 177 | 116 | 90 | 64 | 57 | 71 | 56 | 59 | 104 | 86 | 217 |
| 2010 | 298 | 141 | 163 | 150 | 82 | 68 | 79 | 50 | 48 | 53 | 62 | 131 |

Tabela 20: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Jaguari. Fonte: ONS (2018).

| Usina Hidrelétrica de Jaguari | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 1993 | 26 | 46 | 41 | 32 | 22 | 25 | 16 | 15 | 22 | 19 | 11 | 14 |
| 1994 | 24 | 30 | 35 | 26 | 20 | 14 | 12 | 11 | 9 | 13 | 15 | 29 |
| 1995 | 32 | 98 | 48 | 33 | 26 | 20 | 24 | 16 | 14 | 27 | 20 | 25 |
| 1996 | 57 | 49 | 76 | 40 | 26 | 21 | 17 | 17 | 30 | 23 | 24 | 33 |
| 1997 | 51 | 38 | 32 | 24 | 19 | 24 | 15 | 13 | 15 | 15 | 27 | 25 |
| 1998 | 29 | 48 | 32 | 21 | 22 | 17 | 12 | 12 | 16 | 26 | 16 | 23 |
| 1999 | 69 | 51 | 43 | 26 | 19 | 22 | 17 | 12 | 13 | 10 | 12 | 19 |
| 2000 | 37 | 39 | 32 | 23 | 14 | 12 | 11 | 12 | 21 | 10 | 22 | 35 |
| 2001 | 30 | 35 | 28 | 25 | 16 | 12 | 12 | 12 | 13 | 26 | 20 | 38 |
| 2002 | 51 | 44 | 35 | 24 | 19 | 11 | 11 | 11 | 15 | 8 | 15 | 23 |
| 2003 | 36 | 31 | 24 | 16 | 12 | 11 | 10 | 8 | 8 | 16 | 15 | 19 |
| 2004 | 26 | 44 | 29 | 23 | 22 | 25 | 23 | 13 | 10 | 14 | 24 | 22 |
| 2005 | 47 | 36 | 35 | 28 | 28 | 23 | 18 | 12 | 18 | 21 | 23 | 26 |
| 2006 | 30 | 62 | 39 | 26 | 18 | 17 | 17 | 11 | 14 | 15 | 19 | 40 |
| 2007 | 43 | 23 | 22 | 18 | 13 | 13 | 19 | 11 | 8 | 14 | 25 | 22 |
| 2008 | 34 | 45 | 40 | 40 | 27 | 23 | 14 | 18 | 12 | 16 | 27 | 25 |
| 2009 | 38 | 68 | 48 | 32 | 22 | 19 | 25 | 18 | 23 | 26 | 25 | 74 |
| 2010 | 78 | 46 | 55 | 44 | 30 | 21 | 25 | 15 | 15 | 14 | 17 | 33 |

Tabela 21: Vazão Natural da Usina Hidrelétrica de Funil. Fonte: ONS (2018).

| Usina Hidrelétrica de Funil | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 1993 | 225 | 420 | 398 | 308 | 176 | 187 | 129 | 110 | 167 | 185 | 107 | 139 |
| 1994 | 213 | 253 | 284 | 239 | 187 | 141 | 117 | 89 | 81 | 93 | 141 | 271 |
| 1995 | 244 | 756 | 350 | 251 | 194 | 142 | 157 | 116 | 100 | 249 | 247 | 227 |
| 1996 | 540 | 599 | 728 | 369 | 250 | 194 | 162 | 145 | 239 | 185 | 301 | 291 |
| 1997 | 465 | 329 | 252 | 186 | 149 | 187 | 123 | 106 | 114 | 149 | 259 | 242 |
| 1998 | 301 | 400 | 299 | 213 | 218 | 117 | 117 | 108 | 148 | 247 | 165 | 205 |
| 1999 | 545 | 505 | 372 | 245 | 162 | 169 | 135 | 106 | 109 | 103 | 113 | 198 |
| 2000 | 539 | 388 | 279 | 269 | 141 | 116 | 118 | 116 | 165 | 98 | 193 | 326 |
| 2001 | 283 | 347 | 223 | 199 | 138 | 107 | 100 | 95 | 109 | 159 | 137 | 254 |
| 2002 | 404 | 473 | 276 | 183 | 149 | 109 | 102 | 95 | 101 | 73 | 169 | 252 |
| 2003 | 357 | 268 | 210 | 138 | 106 | 84 | 79 | 70 | 73 | 120 | 141 | 156 |
| 2004 | 223 | 347 | 299 | 262 | 194 | 218 | 184 | 115 | 87 | 127 | 160 | 216 |
| 2005 | 422 | 409 | 289 | 282 | 220 | 162 | 142 | 103 | 130 | 152 | 197 | 272 |
| 2006 | 248 | 500 | 300 | 211 | 136 | 110 | 111 | 87 | 99 | 133 | 221 | 318 |
| 2007 | 424 | 270 | 165 | 143 | 120 | 106 | 139 | 86 | 58 | 100 | 222 | 177 |
| 2008 | 235 | 446 | 415 | 340 | 204 | 173 | 110 | 130 | 97 | 150 | 252 | 308 |
| 2009 | 407 | 647 | 375 | 256 | 169 | 148 | 167 | 156 | 160 | 239 | 221 | 539 |
| 2010 | 754 | 393 | 455 | 403 | 202 | 159 | 174 | 112 | 105 | 121 | 161 | 363 |

VIII.3. GRÁFICO VAZÃO NATURAL X VAZÃO AFLUENTE

A seguir estão oito gráficos (Gráfico 5 ao 12) que comparam a vazão natural com a afluenta no período de 2000 a 2010. O período inicia em 2000, pois a operação em Santa Branca iniciou-se em dezembro de 1999.

O interessante desta comparação é visualizar que nas usinas hidrelétricas de Paraibuna e Jaguari, as vazões naturais e afluentes são as mesmas. Isto ocorre, porque estas usinas são as primeiras a receberem a vazão do rio sem interferência de operação hidráulica energética anterior. A usina de Paraibuna é a primeira usina do rio Paraíba do Sul e a usina de Jaguari, apesar de estar envolvido posteriormente na cascata de operação, preserva os valores de vazão natural por estar num rio afluenta ao Paraíba do Sul, o rio Jaguari.

No que consta as usinas hidrelétricas de Santa Branca e Funil, observa-se a grande interferência das usinas hidrelétricas no fluxo de água que chega aos reservatórios. Santa Branca varia conforme a vazão defluenta liberada pela usina hidrelétrica de Paraibuna e Funil é dependente da vazão liberada pelo conjunto de operação entre as usinas hidrelétricas de Santa Branca e Jaguari.

Gráfico 5: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Paraibuna (2000-2004)

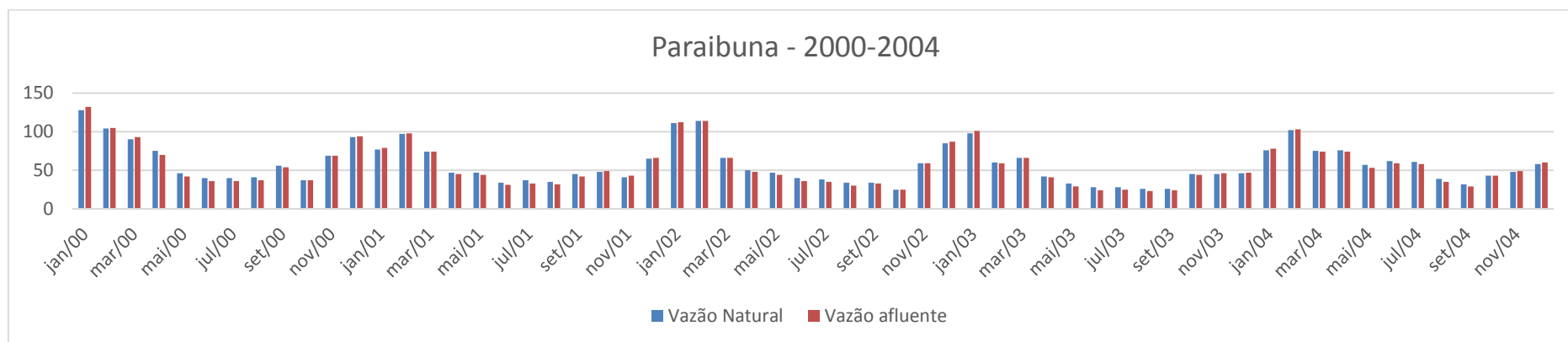


Gráfico 6: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Paraibuna (2005-2010)

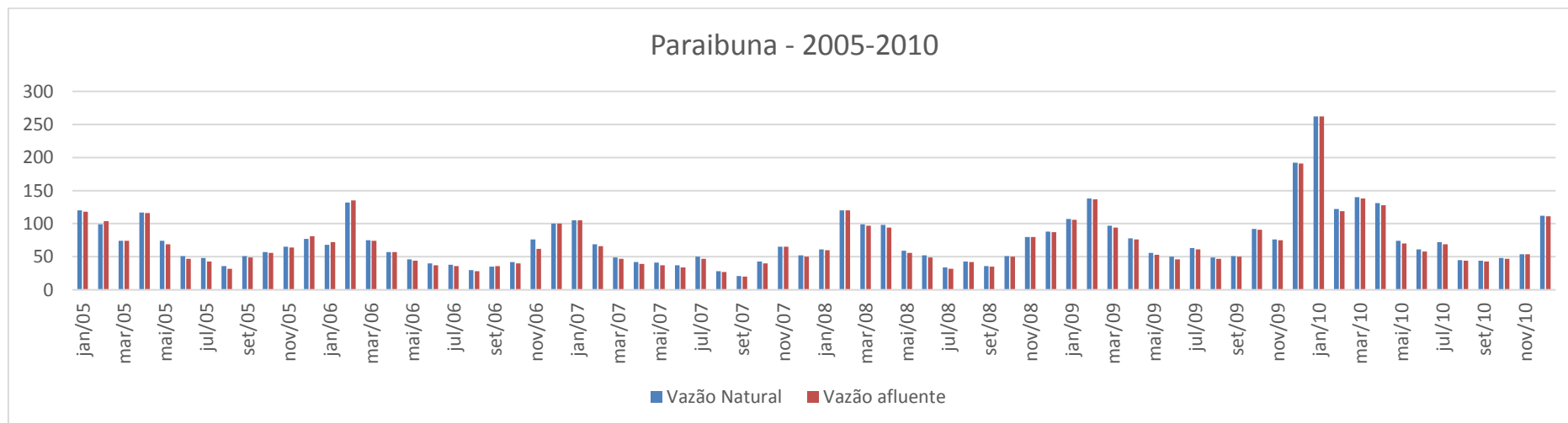


Gráfico 7: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Santa Branca (2000-2004)

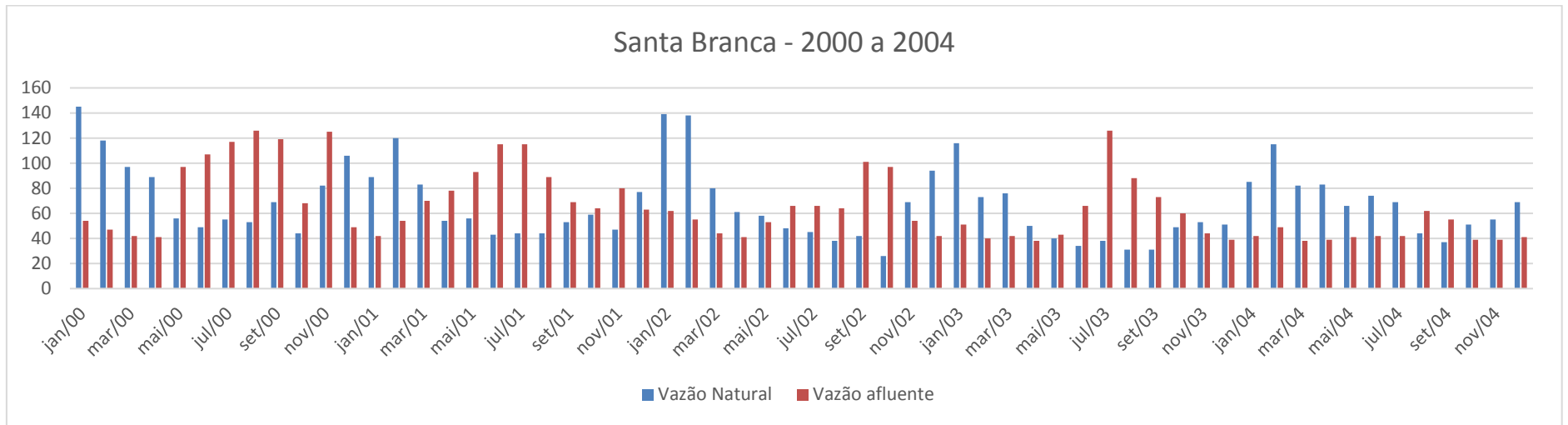


Gráfico 8: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Santa Branca (2005-2010)

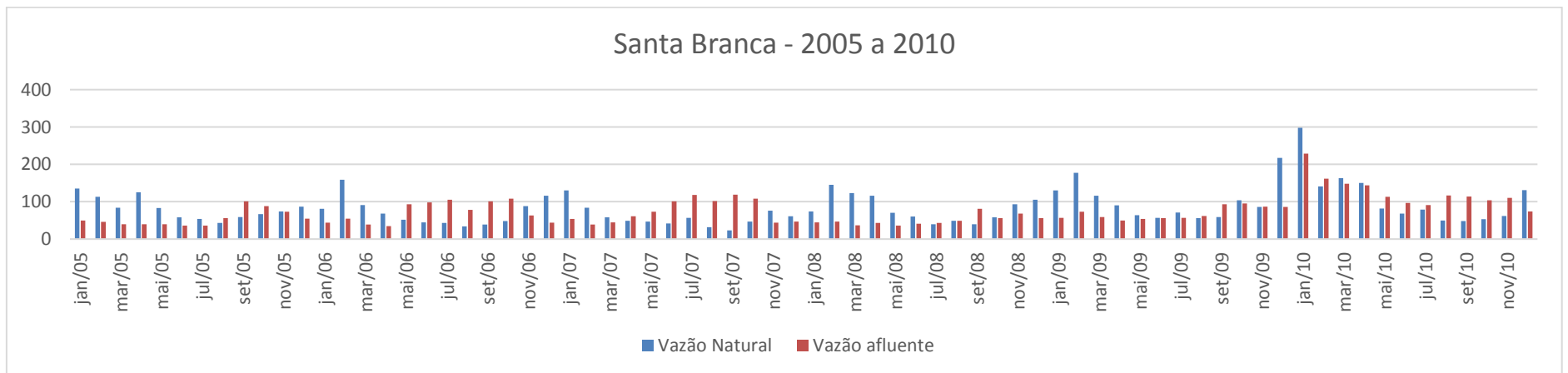


Gráfico 9: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Jaguari (2000-2004)

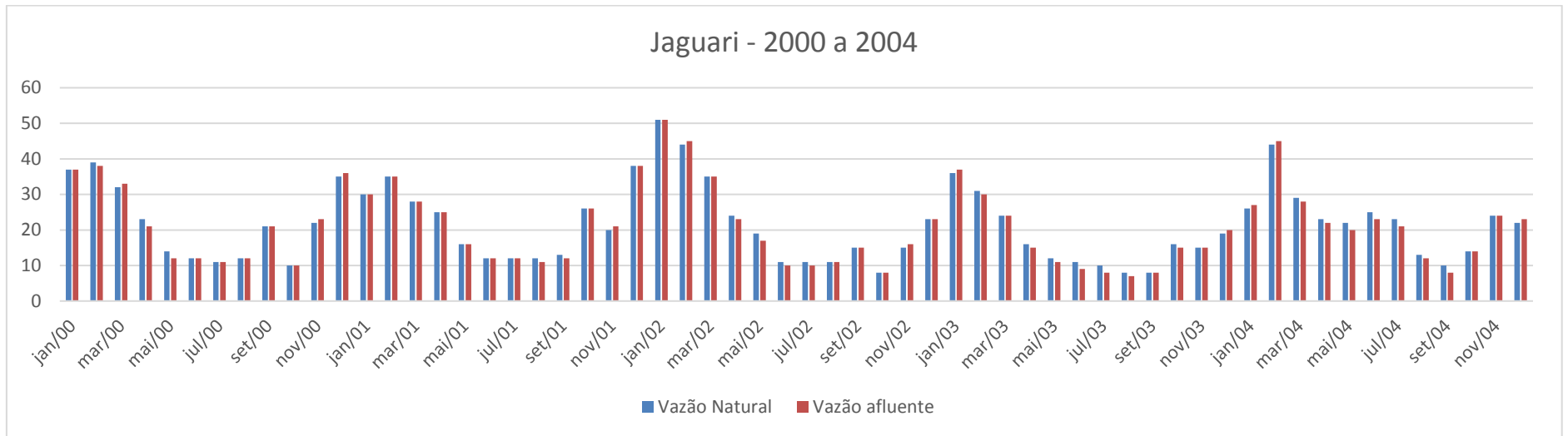


Gráfico 10: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Jaguari (2005-2010)

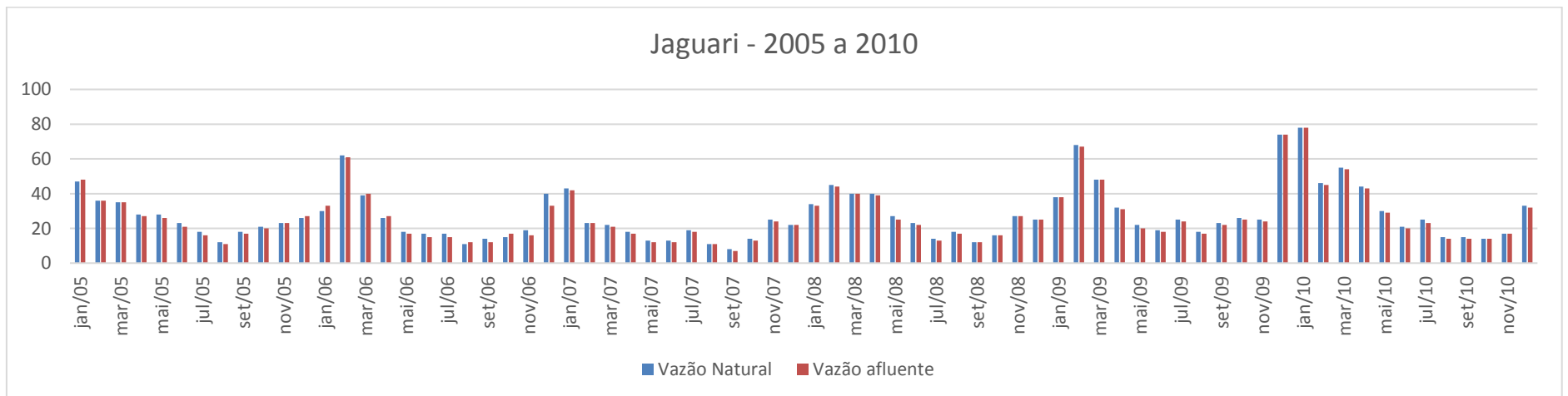


Gráfico 11: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Funil (2000-2004)

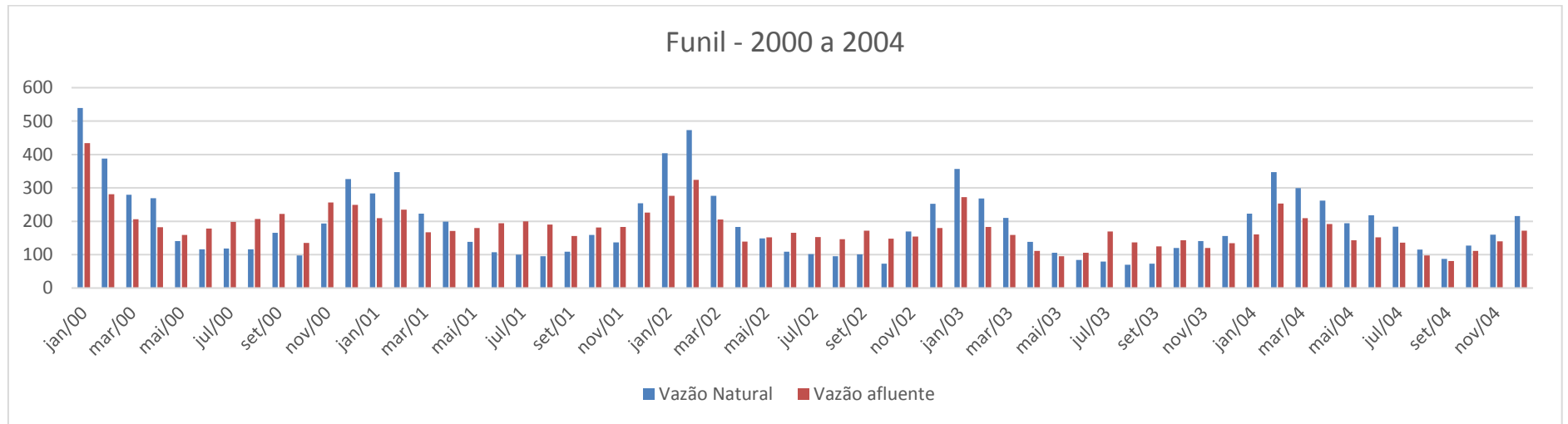
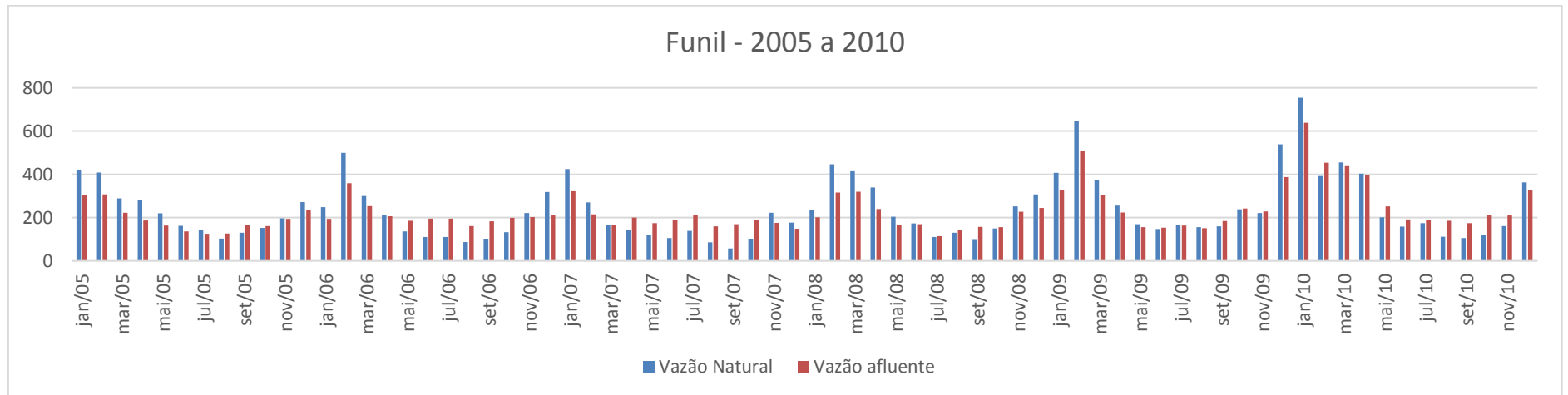


Gráfico 12: Vazão Natural x Vazão Afluente na Usina Hidrelétrica de Funil (2005-2010)



VIII.4. ANÁLISE DE CONTINUIDADE DE VAZÃO

A Tabela 22 abaixo, já está computando os resultados dos cálculos entre as vazões. Para os casos em que as relações de continuidade não foram respeitadas, os seus foram campos realçados.

Tabela 22: Resultados dos cálculos referente a análise de continuidade

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafiuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/01/1999 | -80 | 255 | 24 | 318 | -1,49 |
| 01/02/1999 | -77 | 256 | 25 | 298 | -2,29 |
| 01/03/1999 | -47 | 180 | 14 | 223 | 2,17 |
| 01/04/1999 | -25 | 107 | 11 | 135 | 2,74 |
| 01/05/1999 | 13 | 75 | 8 | 84 | 9,80 |
| 01/06/1999 | 24 | 91 | 8 | 83 | 8,93 |
| 01/07/1999 | 20 | 95 | 7 | 65 | 8,70 |
| 01/08/1999 | 73 | 82 | 11 | 51 | 12,50 |
| 01/09/1999 | 74 | 102 | 12 | 43 | 4,88 |
| 01/10/1999 | 80 | 67 | 15 | 42 | 2,78 |
| 01/11/1999 | 84 | 87 | 14 | 47 | -2,50 |
| 01/12/1999 | 64 | 107 | 10 | 111 | 1,72 |
| 01/01/2000 | -78 | 343 | 17 | 357 | -3,13 |
| 01/02/2000 | -58 | 196 | 14 | 231 | -0,96 |
| 01/03/2000 | -51 | 131 | 7 | 150 | -3,33 |
| 01/04/2000 | -29 | 120 | 14 | 157 | 6,67 |
| 01/05/2000 | 55 | 50 | 10 | 71 | 8,70 |
| 01/06/2000 | 71 | 59 | 9 | 55 | 10,00 |

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafiuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/07/2000 | 81 | 70 | 15 | 52 | 10,00 |
| 01/08/2000 | 89 | 69 | 12 | 51 | 9,76 |
| 01/09/2000 | 65 | 82 | 13 | 75 | 3,57 |
| 01/10/2000 | 31 | 57 | 7 | 44 | 0,00 |
| 01/11/2000 | 56 | 108 | 13 | 89 | 0,00 |
| 01/12/2000 | -45 | 164 | 13 | 185 | -1,08 |
| 01/01/2001 | -37 | 137 | 12 | 164 | -2,60 |
| 01/02/2001 | -44 | 146 | 23 | 192 | -1,03 |
| 01/03/2001 | -4 | 69 | 9 | 112 | 0,00 |
| 01/04/2001 | 33 | 68 | 7 | 120 | 4,26 |
| 01/05/2001 | 49 | 71 | 9 | 66 | 6,38 |
| 01/06/2001 | 84 | 67 | 9 | 52 | 8,82 |
| 01/07/2001 | 82 | 73 | 7 | 44 | 10,81 |
| 01/08/2001 | 57 | 90 | 9 | 39 | 8,57 |
| 01/09/2001 | 27 | 75 | 8 | 43 | 6,67 |
| 01/10/2001 | 15 | 91 | 11 | 74 | -2,08 |
| 01/11/2001 | 37 | 82 | 6 | 70 | -4,88 |
| 01/12/2001 | -3 | 125 | 12 | 139 | -1,54 |
| 01/01/2002 | -50 | 163 | 28 | 214 | -0,90 |
| 01/02/2002 | -59 | 224 | 24 | 291 | 0,00 |
| 01/03/2002 | -22 | 126 | 14 | 161 | 0,00 |
| 01/04/2002 | -7 | 75 | 11 | 98 | 4,00 |
| 01/05/2002 | 9 | 82 | 11 | 72 | 6,38 |
| 01/06/2002 | 30 | 89 | 8 | 50 | 10,00 |

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafiuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/07/2002 | 31 | 77 | 7 | 46 | 7,89 |
| 01/08/2002 | 34 | 71 | 4 | 46 | 11,76 |
| 01/09/2002 | 68 | 56 | 8 | 44 | 2,94 |
| 01/10/2002 | 72 | 43 | 1 | 39 | 0,00 |
| 01/11/2002 | -5 | 84 | 10 | 85 | 0,00 |
| 01/12/2002 | -45 | 115 | 9 | 135 | -2,35 |
| 01/01/2003 | -50 | 184 | 18 | 205 | -3,06 |
| 01/02/2003 | -19 | 113 | 13 | 164 | 1,67 |
| 01/03/2003 | -24 | 93 | 10 | 110 | 0,00 |
| 01/04/2003 | -3 | 58 | 8 | 72 | 2,38 |
| 01/05/2003 | 14 | 41 | 7 | 54 | 12,12 |
| 01/06/2003 | 42 | 31 | 6 | 39 | 14,29 |
| 01/07/2003 | 101 | 35 | 10 | 31 | 10,71 |
| 01/08/2003 | 65 | 42 | 5 | 31 | 11,54 |
| 01/09/2003 | 49 | 44 | 5 | 34 | 7,69 |
| 01/10/2003 | 16 | 68 | 4 | 55 | 2,22 |
| 01/11/2003 | -2 | 61 | 8 | 73 | -2,22 |
| 01/12/2003 | -8 | 75 | 5 | 86 | -2,17 |
| 01/01/2004 | -36 | 92 | 9 | 112 | -2,63 |
| 01/02/2004 | -54 | 159 | 13 | 188 | -0,98 |
| 01/03/2004 | -36 | 143 | 7 | 188 | 1,33 |
| 01/04/2004 | -35 | 131 | 7 | 156 | 2,63 |
| 01/05/2004 | -12 | 82 | 9 | 106 | 7,02 |
| 01/06/2004 | -17 | 87 | 12 | 119 | 4,84 |

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/07/2004 | -16 | 73 | 8 | 92 | 4,92 |
| 01/08/2004 | 27 | 24 | 5 | 58 | 10,26 |
| 01/09/2004 | 26 | 18 | 5 | 40 | 9,38 |
| 01/10/2004 | -4 | 58 | 8 | 62 | 0,00 |
| 01/11/2004 | -10 | 77 | 7 | 81 | -2,08 |
| 01/12/2004 | -19 | 108 | 11 | 125 | -3,45 |
| 01/01/2005 | -68 | 204 | 15 | 240 | 1,67 |
| 01/02/2005 | -58 | 226 | 14 | 260 | -5,05 |
| 01/03/2005 | -34 | 147 | 10 | 170 | 0,00 |
| 01/04/2005 | -76 | 120 | 8 | 129 | 0,85 |
| 01/05/2005 | -29 | 98 | 9 | 109 | 6,76 |
| 01/06/2005 | -11 | 79 | 7 | 81 | 7,84 |
| 01/07/2005 | -7 | 73 | 6 | 70 | 10,42 |
| 01/08/2005 | 24 | 59 | 7 | 48 | 11,11 |
| 01/09/2005 | 52 | 48 | 8 | 53 | 3,92 |
| 01/10/2005 | 32 | 53 | 10 | 64 | 1,75 |
| 01/11/2005 | 9 | 98 | 9 | 100 | 1,54 |
| 01/12/2005 | -26 | 151 | 10 | 159 | -5,19 |
| 01/01/2006 | -28 | 117 | 13 | 137 | -5,88 |
| 01/02/2006 | -80 | 243 | 27 | 279 | -2,27 |
| 01/03/2006 | -35 | 174 | 16 | 170 | 1,33 |
| 01/04/2006 | -22 | 145 | 11 | 117 | 0,00 |
| 01/05/2006 | 49 | 75 | 6 | 66 | 4,35 |
| 01/06/2006 | 61 | 82 | 5 | 48 | 7,50 |

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/07/2006 | 69 | 75 | 5 | 51 | 5,26 |
| 01/08/2006 | 50 | 71 | 4 | 42 | 6,67 |
| 01/09/2006 | 65 | 70 | 4 | 46 | -2,86 |
| 01/10/2006 | 68 | 74 | 6 | 70 | 4,76 |
| 01/11/2006 | 1 | 124 | 12 | 114 | 18,42 |
| 01/12/2006 | -56 | 134 | 16 | 162 | 0,00 |
| 01/01/2007 | -51 | 226 | 25 | 251 | 0,00 |
| 01/02/2007 | -27 | 153 | 15 | 163 | 4,35 |
| 01/03/2007 | -2 | 101 | 9 | 85 | 4,08 |
| 01/04/2007 | 22 | 122 | 7 | 76 | 7,14 |
| 01/05/2007 | 36 | 89 | 6 | 60 | 9,76 |
| 01/06/2007 | 67 | 75 | 5 | 51 | 8,11 |
| 01/07/2007 | 71 | 77 | 7 | 63 | 6,00 |
| 01/08/2007 | 75 | 47 | 4 | 43 | 3,57 |
| 01/09/2007 | 99 | 44 | 2 | 27 | 4,76 |
| 01/10/2007 | 68 | 68 | 4 | 39 | 6,98 |
| 01/11/2007 | -21 | 108 | 11 | 121 | 0,00 |
| 01/12/2007 | -3 | 80 | 9 | 94 | 3,85 |
| 01/01/2008 | -15 | 123 | 13 | 127 | 1,64 |
| 01/02/2008 | -73 | 225 | 25 | 256 | 0,00 |
| 01/03/2008 | -60 | 243 | 24 | 252 | 2,02 |
| 01/04/2008 | -51 | 158 | 18 | 184 | 4,08 |
| 01/05/2008 | -20 | 104 | 11 | 107 | 5,08 |
| 01/06/2008 | -8 | 106 | 8 | 90 | 5,77 |

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/07/2008 | 11 | 58 | 6 | 56 | 5,88 |
| 01/08/2008 | 7 | 77 | 6 | 63 | 2,33 |
| 01/09/2008 | 46 | 64 | 4 | 45 | 2,78 |
| 01/10/2008 | 6 | 84 | 7 | 76 | 1,96 |
| 01/11/2008 | -12 | 133 | 13 | 132 | 0,00 |
| 01/12/2008 | -31 | 164 | 17 | 178 | 1,14 |
| 01/01/2009 | -49 | 233 | 23 | 239 | 0,93 |
| 01/02/2009 | -64 | 368 | 39 | 402 | 0,72 |
| 01/03/2009 | -35 | 199 | 19 | 211 | 3,09 |
| 01/04/2009 | -26 | 143 | 12 | 134 | 2,56 |
| 01/05/2009 | 1 | 82 | 8 | 83 | 5,36 |
| 01/06/2009 | 10 | 80 | 7 | 72 | 8,00 |
| 01/07/2009 | -4 | 82 | 8 | 71 | 3,17 |
| 01/08/2009 | 15 | 72 | 7 | 82 | 4,08 |
| 01/09/2009 | 43 | 69 | 8 | 78 | 1,96 |
| 01/10/2009 | 4 | 122 | 12 | 109 | 1,09 |
| 01/11/2009 | 12 | 118 | 10 | 110 | 1,32 |
| 01/12/2009 | -105 | 228 | 25 | 248 | 0,52 |
| 01/01/2010 | -33 | 332 | 36 | 378 | 0,00 |
| 01/02/2010 | 43 | 247 | 19 | 206 | 2,46 |
| 01/03/2010 | 10 | 236 | 23 | 237 | 1,43 |
| 01/04/2010 | 16 | 209 | 19 | 209 | 2,29 |
| 01/05/2010 | 43 | 110 | 8 | 90 | 5,41 |
| 01/06/2010 | 39 | 75 | 7 | 70 | 4,92 |

| Ano | VAZÃO AFLUENTE INCREMENTAL | | VAZÃO NATURAL INCREMENTAL | | Diferença Percentual entre a Qnatural e a Qafiuente |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|
| | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | Santa Branca-Paraibuna | Funil-(Santa Branca + Jaguari) | |
| 01/07/2010 | 22 | 77 | 7 | 70 | 4,17 |
| 01/08/2010 | 73 | 54 | 5 | 47 | 2,22 |
| 01/09/2010 | 71 | 47 | 4 | 42 | 2,27 |
| 01/10/2010 | 57 | 95 | 5 | 54 | 2,08 |
| 01/11/2010 | 56 | 83 | 8 | 82 | 0,00 |
| 01/12/2010 | -37 | 220 | 19 | 199 | 0,89 |