



151 - AS NOVAS OBRAS DE EXPANSÃO E A SEGURANÇA HÍDRICA AO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

José Celso Marins

Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia Sorocaba – SP (1990); Pós Graduado em Administração de Empresas pela UNIMEP – Piracicaba SP (1995), Mestrando em Energia no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

Engenheiro com experiência profissional na Eletropaulo, EDP Bandeirante e CPFL, por 18 anos, ingressou na SABESP em abril/2011 atualmente é Engenheiro no Departamento de Planejamento Gestão e Operação da Produção da Diretoria Metropolitana, e-mail: jcmarins@sabesp.com.br.

Renato Carlos Zambon

Professor Doutor do Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e-mail: rczambon@usp.br

RESUMO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) sofreu a maior seca de sua história, iniciada em 2013 e ainda não encerrada em 2019. Com 21,4 milhões de habitantes, a RMSP é atendida por um dos maiores sistemas de abastecimento de água do mundo, com oito sistemas produtores de água parcialmente interligados. No período mais severo da crise hídrica, foram tomadas medidas como redução da vazão de captação, utilização de captação flutuante para uso da água do volume morto do sistema Cantareira, redução de pressão nas redes de distribuição de água no período noturno e bônus aos consumidores que reduzissem o consumo. Em 2018, duas importantes ampliações do sistema foram colocadas em operação: a transposição do Rio Paraíba do Sul ao sistema Cantareira e o novo Sistema Produtor de Água São Lourenço. Adicionalmente, a transposição do Rio Pequeno ao sistema Alto Tietê. Este artigo apresenta, discute limitações e melhorias sobre a utilização do SISAGUA, um modelo de otimização não linear para sistemas complexos de abastecimento de água com múltiplos reservatórios, para avaliar o benefício das expansões recentes do sistema de suprimento de água na RMSP sob condições de severa crise hídrica.

PALAVRAS-CHAVE: reservatórios, programação não linear, seca

INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo tem sofrido a maior seca de sua história, iniciada em outubro de 2013 e não encerrada até o primeiro semestre de 2019. Com 21,3 milhões de habitantes, esta região tem um dos maiores sistemas de abastecimento de água do mundo. Conta com oito sistemas produtores de água parcialmente interligados. O sistema Cantareira é o maior deles, com capacidade de produzir 33 m³/de água tratada, volume útil de 983 hm³ e atende aproximadamente 9 milhões de pessoas. Foi o sistema produtor que mais sofreu com a crise hídrica, operando emergencialmente durante 18 meses utilizando água do volume morto através de captação flutuante para minimizar o impacto da redução do suprimento de água à população. No período mais severo da crise hídrica um conjunto de medidas foi tomado para reduzir o impacto no desabastecimento de água à população: aumento da integração entre os sistemas produtores, redução de pressão nas redes de distribuição no período noturno, *retrofit* em redes de distribuição. As duas com o mesmo objetivo: reduzir as perdas reais de água por vazamento nas redes. Entre as medidas mais importantes destaca-se a campanha com bônus aos clientes que reduzissem o consumo de água em suas instalações. Houve uma redução de 4,1 m³/s na demanda do Sistema Integrado Metropolitano (SIM) e 76% dos consumidores reduziram o uso de água, sendo que 37% conseguiram atingir a meta necessária de 20% de economia para a bonificação (PORTAL GOVERNO SP, 2014).

Em maio/2015, o Sistema Produtor Alto Tietê recebeu um incremento de 4,0 m³/s do manancial da Billings e do Rio Guaió que proporcionam maior segurança hídrica ao sistema. O sistema Cantareira também passou a receber, a partir de janeiro/2018, água do Rio Paraíba do Sul, com capacidade máxima de transposição de 8,5 m³/s. Esta transposição não traz um incremento na capacidade de produção do abastecimento de água à Região Metropolitana de São Paulo, mas aumenta a segurança hídrica relacionada aos mananciais deste sistema



produtor. O custo de energia de transposição da repesa do Jaguari-CESP para a Atibainha é alto e o Rio Paraíba do Sul tem outras finalidades para o uso da água como geração de energia elétrica e abastecimento de 13,2 milhões de habitantes no Estado do Rio de Janeiro. O Sistema Produtor de Água São Lourenço colocado em operação em abril/2018, por sua vez, traz um aumento na capacidade de abastecimento de água da ordem de 4,7 m³/s, mas o custo de energia para captar água do reservatório Cachoeira do França é bastante elevado em função do desnível geométrico de mais de 300 metros, além da mesma fonte de recurso hídrico competir com geração de energia elétrica.

Em termos de vazão afluente natural, principalmente nos mananciais do sistema Cantareira, não se pode considerar que a seca terminou, mas, as medidas emergenciais adotadas e as novas ampliações permitiram uma recuperação significativa na qualidade do atendimento e no armazenamento do Sistema Integrado Metropolitano (SIM) de abastecimento de água.

Diferentes técnicas de otimização, incluindo programação linear (PL), não linear (PNL), e programação dinâmica (PD), têm sido utilizadas para otimização de sistemas complexos de abastecimento de água com múltiplos reservatórios interligados (Loucks et al. 2005; Simonovic 1992; Talukdar et al. 2012). Logica Fuzzy (LF), Rede Neural Artificial (RNA) são outras técnicas que vem sendo utilizadas com a mesma finalidade (Mousavi et al. 2004; Oliveira and Loucks 1997). Na prática, muitas vezes as decisões de operação são baseadas em curvas guias que são determinadas em função do volume reservado e vazões captadas pelo período analisado. (Chen et al. 2007; Liu et al. 2011; Loucks et al. 2005; Ngo et al. 2007; U.S. Army Corps of Engineers 2018; Zhu et al. 2014).

Neste trabalho, revisto e atualizado em relação a estudo anterior (Marins et al. 2019), será utilizado o SISAGUA (Barros et. al., 2008) um modelo matemático de otimização não linear desenvolvido para auxiliar a gestão e operação de sistemas complexos de abastecimento de água com múltiplos reservatórios interligados. Serão avaliados através deste modelo os benefícios para o SIM das novas ampliações que já estão em operação, submetidas a condições hidrológicas severas equivalentes às de outubro/2013 a setembro/2017.

METODOLOGIA UTILIZADA

O modelo SISAGUA (Barros et. Al., 2008) é baseado na formulação de uma rede com os principais componentes de um sistema de abastecimento de água e são representados por um conjunto de arcos e nós. A otimização é feita, de forma sequencial, em três etapas através do conceito de prioridades preemptivas.

A primeira etapa, minimiza-se o déficit ao quadrado de atendimento em cada nó de demanda do sistema. Na segunda etapa, é determinada uma política de gestão dos mananciais, minimizando os desvios entre os volumes armazenados e uma curva guia para cada reservatório de água bruta. Na terceira etapa são minimizados os custos operacionais de abastecimento, principalmente custos de energia elétrica das estações de bombeamento e custos de tratamento de água. A cada etapa, são preservados os benefícios já obtidos nas etapas anteriores, reduzindo gradativamente os espaços de soluções viáveis do processo de otimização, mas permitindo melhorias nos objetivos subsequentes.

A formulação matemática resulta em um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), ou de Programação Não Linear (PNL), dependendo das opções selecionadas (Suzuki et al. 2015). O processo da otimização é resolvido com o uso do *General Algebraic Modeling System* (GAMS 2018).

RESULTADOS OBTIDOS

Em outubro de 2013, a RMSP estava com 50% de volume útil em seus mananciais, valor típico para o início de uma nova estação úmida. Uma seca extrema ao longo dos 12 meses seguintes fez com que os reservatórios reduzissem seus volumes úteis reservados para apenas 8,34% em setembro/2014.

O sistema Cantareira, o maior da RMSP, foi o que mais sofreu com a crise hídrica. Em junho/2014, o volume reservado ficou abaixo do volume mínimo operacional e um conjunto de bombas com captação flutuante foi instalado para viabilizar a continuidade do abastecimento deste manancial. Os reservatórios de água bruta do sistema Cantareira permaneceram por 18 meses captando água do volume morto. A figura 2 é uma foto que

mostra a condição dos reservatórios no auge da crise hídrica, com a captação flutuante, uma barragem interna e canal construídos dentro do reservatório, e a torre de tomada original trabalhando em série.



Figura 2 - Reservatórios do Cantareira captando água do volume morto (set/2014)

O ano de 2015 mostrou continuidade da seca extrema. A Figura 3 mostra as médias de longo termo das vazões naturais afluentes ao sistema Cantareira, as mínimas vazões ocorridas em 1953 que era o recorde da série histórica até então, e as ocorridas entre 2014 e 2017.

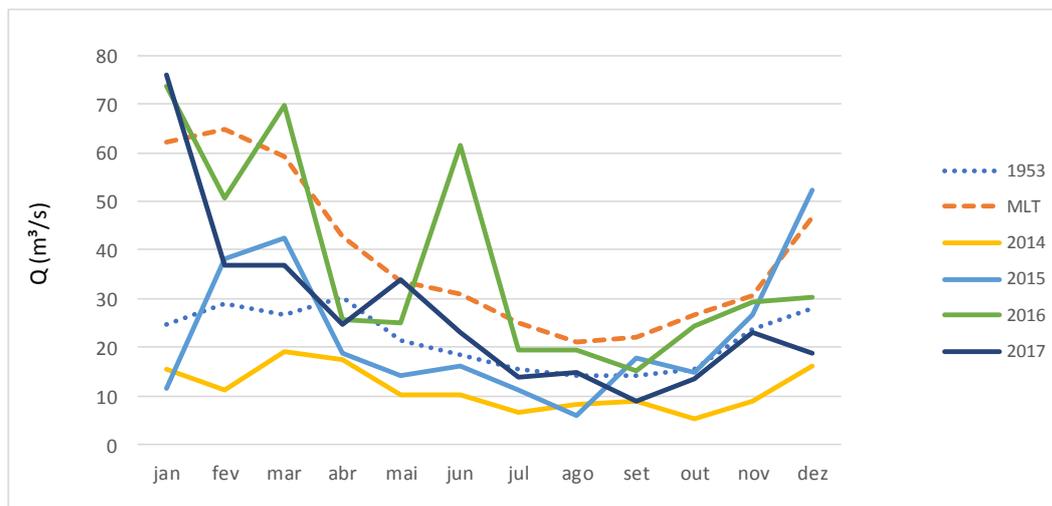


Figura 3 - Vazões naturais afluentes ao sistema Cantareira

Apesar da vazão afluente ter aumentado em 2016 e 2017, elas ainda se encontram abaixo das vazões médias de longo termo, mas já demonstram uma clara redução da severidade da seca. Além disso, houve redução da demanda da RMSP de 71 m³/s para 61 m³/s e a entrada em operação das novas ampliações do sistema, permitindo uma recuperação significativa do armazenamento no sistema Cantareira, como pode ser observado na Figura 4.

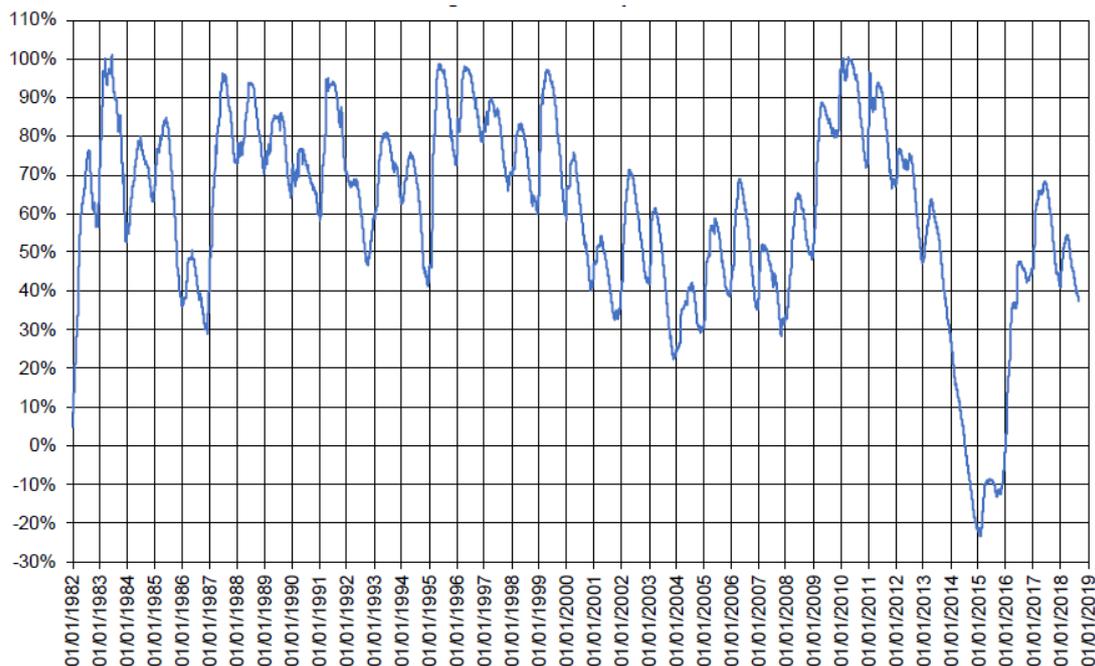


Figura 4 – Volume útil do sistema Cantareira de 1982 a 2018 (ANA, 2018)

A tabela 1 apresenta as principais obras realizadas pela SABESP-Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, colocadas em operação durante e após a crise hídrica:

Tabela 1 - Principais obras de expansão do abastecimento de água a RMSP entre 2013 e 2018

Sistemas	Capacidade (m ³ /s) em 2013	Situação em 2018 c/ obras de ampliação	Preocupações
Cantareira	33,0	Transposição de água bruta do Rio Paraíba do Sul para reforço do sistema Cantareira, com capacidade máxima de 8,5 m ³ /s	Alto custo de energia elétrica na transposição e compete com geração de energia elétrica e abastecimento do Rio de Janeiro
Guarapiranga	15,0	Aumento da capacidade de produção para 16 m ³ /s com a implantação de unidade de tratamento de água por membranas	Alto custo de operação e manutenção do sistema de tratamento por membranas
Rio Grande	4,8	Aumento da capacidade de produção para 5,3 m ³ /s com a ampliação da estação de tratamento de água com membranas	Alto custo de operação e manutenção do sistema de tratamento por membranas
Alto Tietê	15,0	Transposição de água bruta do sistema Billings e rio Guaió com capacidade de 4,0 m ³ /s	Alto custo de operação dos geradores a gás natural e restrições de captação no Rio Guaió
São Lourenço	4,7	Incremento de 4,7 m ³ /s na capacidade de abastecimento de água do SIM	Alto custo de energia para adução de água bruta e compete com geração hidrelétrica

Para avaliar indicadores de melhoria na confiabilidade do SIM com as expansões recentes, será utilizado o modelo SISAGUA considerando o sistema ampliado e como cenário hidrológico as séries de vazões da seca

severa do período de outubro/2013 a setembro/2017, volume inicial dos reservatórios conforme estavam em 01/10/2013 e sob duas condições de demanda: 61 m³/s e 71 m³/s.

Na Figura 5 é apresentada a configuração simplificada do SIM, já com a inclusão dos novos sistemas de transposição de água e o novo sistema de produção de água São Lourenço.

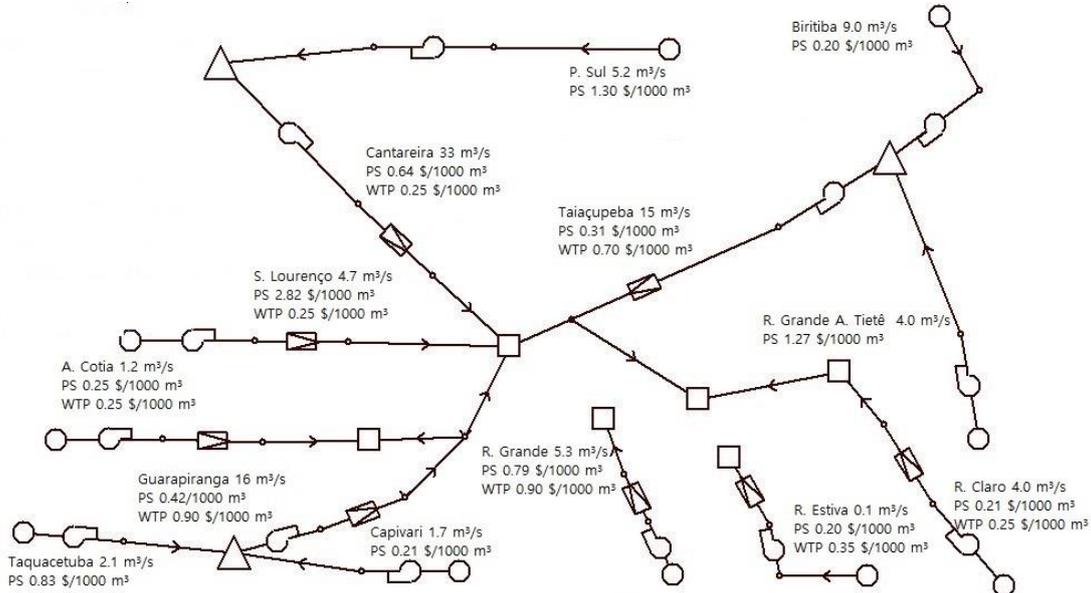


Figura 5 - Configuração simplificada de abastecimento de água da RMSP

Com a demanda de 61 m³/s haveria pleno atendimento a demanda, e uma recuperação rápida do armazenamento depois do segundo ano do horizonte de planejamento considerado, mantendo em níveis máximos no quarto ano como pode ser observado na Figura 6, Figura 8 e Figura 10. A transposição do Paraíba do Sul seria utilizada no limite da sua capacidade a maior parte do tempo como mostra a Figura 7, o mesmo ocorrendo na transposição para o Alto Tietê como indicado na Figura 9.

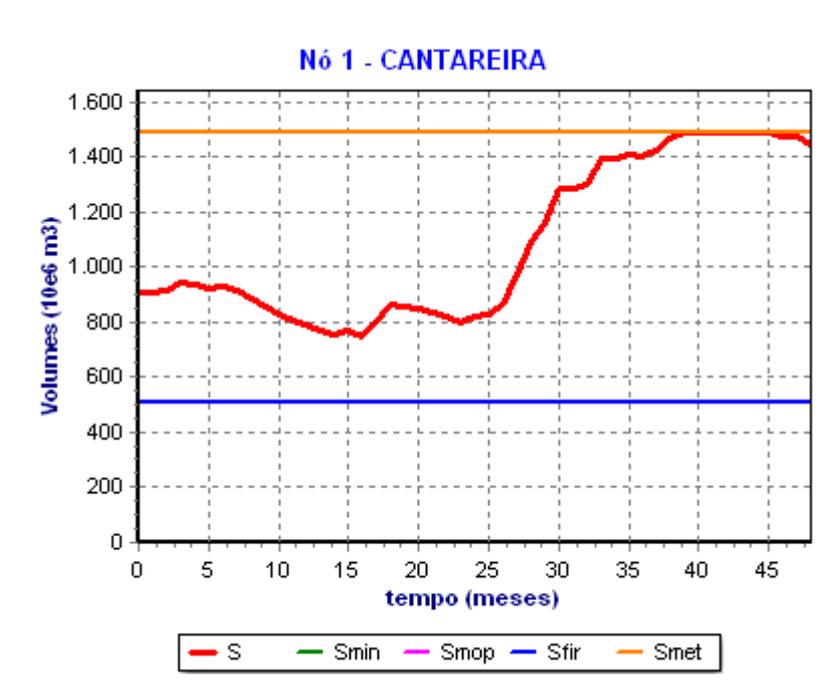


Figura 6 - Volume útil do sistema Cantareira, com demanda SIM 61 m³/s

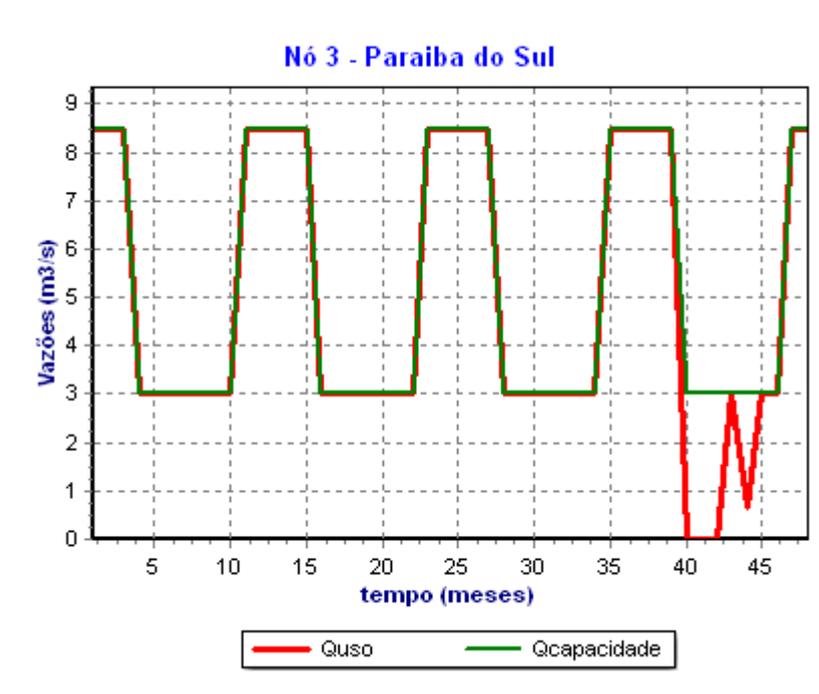


Figura 7 - Vazão de operação EEAB Rio Paraíba do Sul – Cantareira, com demanda SIM 61 m³/s

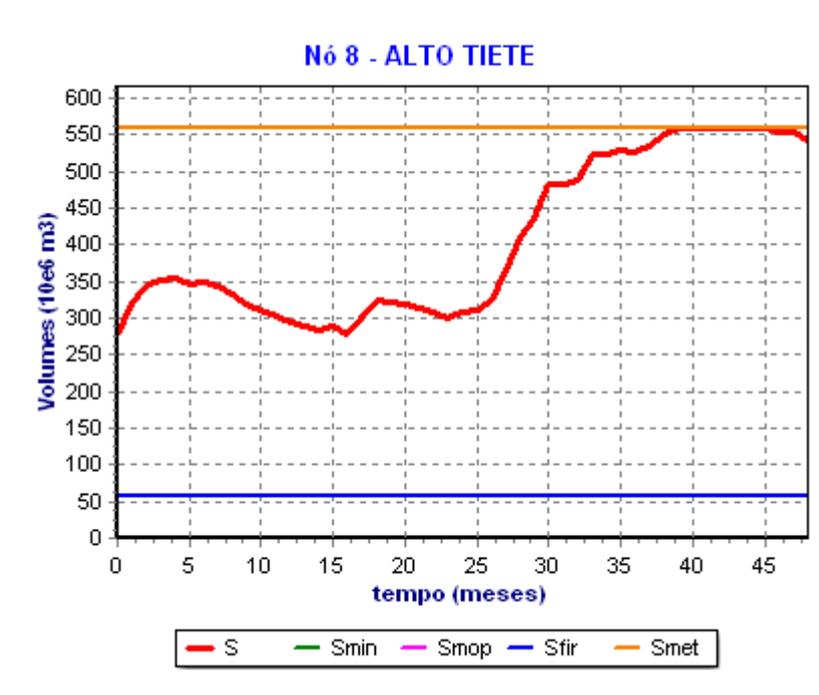


Figura 8 - Volume útil do sistema Alto Tietê, com demanda SIM 61 m³/s

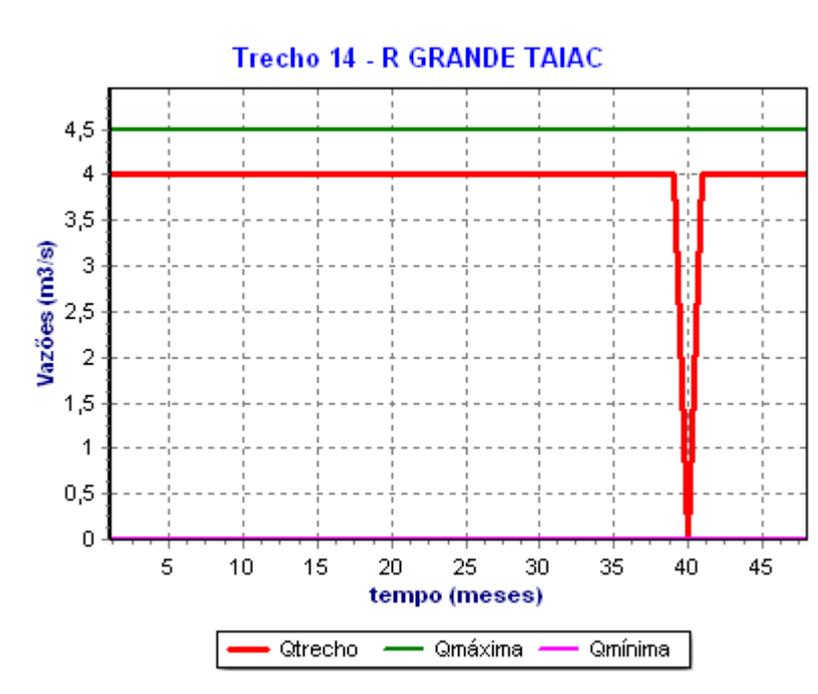


Figura 9 - Vazão de operação EEAB Rio Grande Taiacupeba, com demanda SIM 61 m³/s

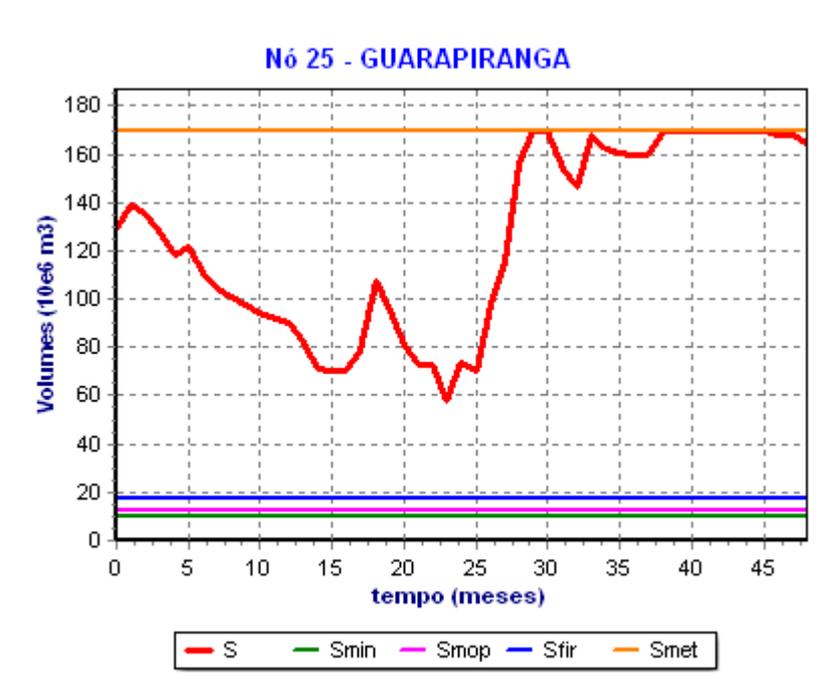


Figura 10 - Volume útil do sistema Guarapiranga, com demanda SIM 61 m³/s

Com a demanda de 71 m³/s, haveria nos dois anos iniciais do horizonte de planejamento uma redução de 1 m³/s no atendimento, a plena utilização das ampliações recentes do SIM e uma recuperação parcial dos níveis de armazenamento, como pode ser observado nas Figuras 11, 12 e 13.

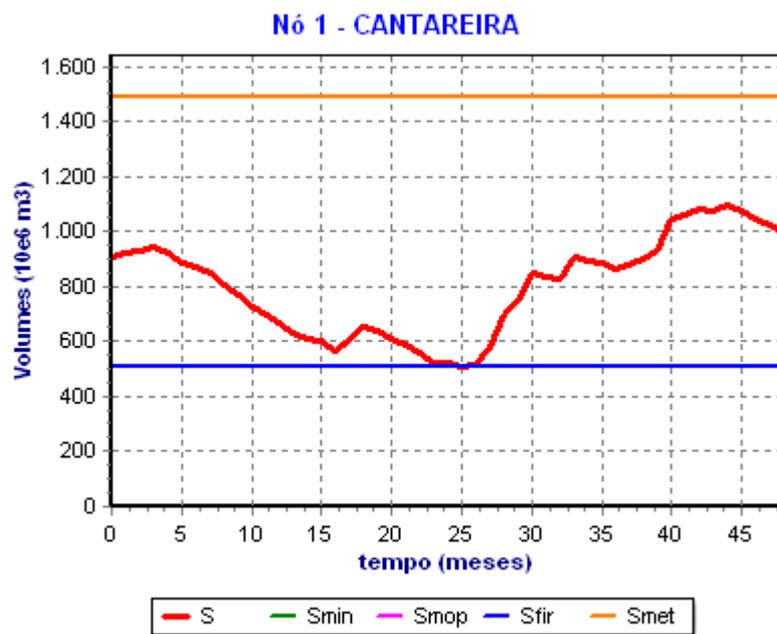


Figura 11 - Volume útil do sistema Cantareira, com demanda SIM 71 m³/s

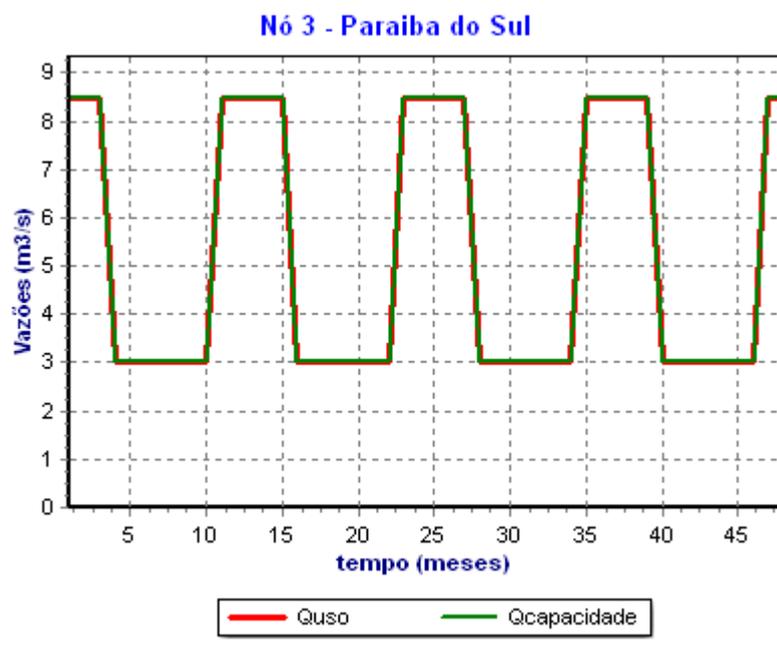


Figura 12 - Vazão de operação EEAB Rio Paraiba do Sul – Cantareira, com demanda SIM 71 m³/s

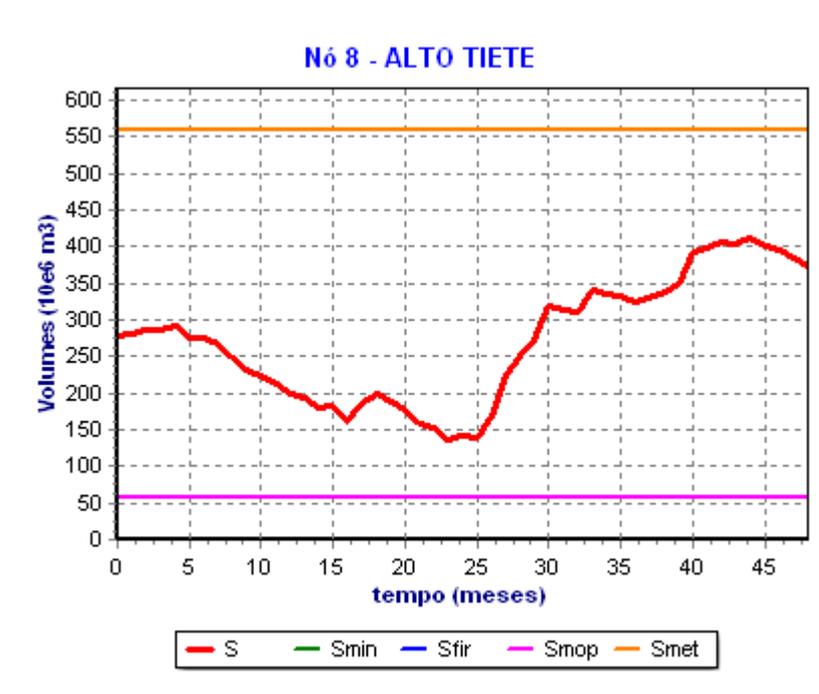


Figura 13 - Volume útil do sistema Alto Tietê, com demanda SIM 71 m³/s

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com demanda de 61 m³/s, notamos que mesmo diante de uma situação hidrológica extremamente desfavorável, principalmente nos primeiros 24 meses do período analisado, o volume dos três principais reservatórios do SIM mantiveram-se acima dos níveis mínimos operacionais, sem uso adicional de parte do volume morto e demonstrando o potencial de contribuição dos novos sistemas de transposição de água bruta e do sistema de produção de água São Lourenço para recuperar os níveis de armazenamento nos reservatórios sem ocorrência de falhas no atendimento a demanda. A partir do vigésimo quinto mês de estudo, percebe-se um aumento nas vazões afluentes dos mananciais, continuidade na operação dos sistemas de transposição e os reservatórios dos sistemas Cantareira, Guarapiranga e Alto Tietê atingem o limite máximo de volume útil ao final do período avaliado.

Com demanda de 71 m³/s, já registrada em períodos anteriores à crise hídrica, e com mesma série hidrológica de extrema seca do caso anterior, percebe-se que diante de um incremento de 10 m³/s na demanda do SIM, mesmo com a operação das novas ampliações, os reservatórios do sistema Cantareira atingem o nível mínimo do volume útil do vigésimo terceiro ao vigésimo quinto mês de análise (Figura 11) e a partir do vigésimo sexto mês inicia a recuperação do volume útil ficando ao final do período de estudo um pouco acima do volume inicial observado. Os reservatórios do sistema Alto Tietê também apresentam redução no seu volume armazenado (Figura 13) e a partir do vigésimo quinto mês ocorre a recuperação. Os sistemas de transposição e o sistema São Lourenço operaram durante todo período analisado. Diante do incremento da demanda e forte queda do volume útil armazenado do Cantareira, nos primeiros 26 meses do estudo, seria imposta uma restrição de 1,0 m³/s nas demandas de atendimento do nó principal.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa demonstrou que a crise hídrica foi severa, principalmente no sistema Cantareira. As ações de gestão da demanda que permitiram a redução no SIM de 71 m³/s para 61 m³/s foram extremamente importantes para minimizar os impactos da crise. Mesmo encerradas as medidas mais severas de controle, é observada persistência na redução, o que é benéfico mesmo em condições hidrológicas mais favoráveis.

As ampliações que entraram recentemente em operação são importantes para enfrentamento de cenários hidrológicos desfavoráveis, como o observado entre 2013-2015. Uma maior integração entre os sistemas produtores também traz maior flexibilidade para o planejamento da operação.

O modelo indicou, principalmente no primeiro caso, o que pode ser considerado uso excessivo dos novos sistemas se considerarmos seu elevado custo de operação: os três principais sistemas de reservatórios (Cantareira, Guarapiranga e Alto Tietê) terminaram o período de estudo em sua capacidade máxima de reservação. O uso das ampliações poderia ser menor nos dois anos finais, pois o custo de energia é muito alto nas elevatórias de transposição e na adução da água bruta do sistema São Lourenço, sem comprometer o abastecimento futuro no sistema.

Isso ocorreu em função da formulação original da metodologia de otimização com prioridades preemptivas, considerando em primeiro lugar evitar ou minimizar o racionamento, em segundo lugar maximizar e equilibrar os armazenamentos nos múltiplos reservatórios e somente em terceiro e último lugar minimizar os custos de operação.

Tal política de operação era razoável quando o SIM dependia principalmente de sistemas produtores cujo papel principal é o abastecimento de água, que é o caso do Cantareira, Guarapiranga e Alto Tietê, mas deixa de reconhecer que parte das ampliações exerce um papel diferenciado. A competição significativa com outros usos da água e o custo muito elevado de operação traz um papel complementar a esses novos sistemas, que devem entrar em operação o suficiente para garantir a segurança hídrica do conjunto do sistema, mas sem necessidade de elevar os níveis de armazenamento a qualquer custo.

Para envolver de forma integrada aspectos de segurança hídrica e de custos de operação dos novos sistemas de transposição e do novo sistema produtor São Lourenço, recomenda-se pesquisar modificações na formulação original do modelo SISAGUA, integrando as funções objetivo de política de gestão dos mananciais com a minimização dos custos operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA.. “Agência Nacional de Águas.” <http://www.ana.gov.br> , 2018.
2. Barros, M. T. L., Zambon, R. C., Barbosa, P. S. F., and Yeh, W. W.-G. “Planning and Operation of Large-Scale Water Distribution Systems with Preemptive Priorities.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(3), 247–256, 2008.
3. Chen, L., McPhee, J., and Yeh, W. W.-G.. “A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves.” *Advances in Water Resources*, 30(5), 1082–1093, 2007.
4. GAMS. “General Algebraic Modeling System” <http://www.gams.com>, 2018.
5. Liu, X., Guo, S., Liu, P., Chen, L., and Li, X.. “Deriving Optimal Refill Rules for Multi-Purpose Reservoir Operation.” *Water Resources Management*, 25(2), 431–448, 2011.
6. Loucks, D. P., Beek, E. van, Stedinger, J. R., Dijkman, J. P. M., and Villars, M. T.. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. UNESCO, Paris, 2005.
7. Marins, J. C., Chang, A. I. C., Zambon, R. C., and Yeh, W. W.-G. “Facing the drought and new water supply planning challenges in the Metropolitan Region of São Paulo.” *World Environmental and Water Resources Congress 2019*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2019. No prelo.
8. Mousavi, S. J., Karamouz, M., and Menhadj, M. B.. “Fuzzy-State Stochastic Dynamic Programming for Reservoir Operation.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(6), 460–470, 2004.
9. Ngo, L. Le, Madsen, H., and Rosbjerg, D.. “Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir, Vietnam.” *Journal of Hydrology*, 336(3–4), 269–281, 2007.
10. Oliveira, R., and Loucks, D. P.. “Operating rules for multireservoir systems.” *Water Resources Research*, 33(4), 839–852, 1997.



11. Portal do Governo do Estado de São Paulo. Bonus por economia de água vai valer em 31 municípios da Grande São Paulo., São Paulo, 31/03/2014. Disponível em <http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/ultimas-noticias/bonus-por-economia-de-agua-vai-valer-em-31-municipios-da-grande-sao-paulo/>, acesso em 11/05/2019.
12. Sabesp. “Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.” <http://www.sabesp.com.br>, 2018.
13. Simonovic, S. P.. “Reservoir Systems Analysis: Closing Gap between Theory and Practice.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), 262–280, 1992.
14. Suzuki, A. H., Zambon, R. C., and Yeh, W. W.-G.. “Water Supply Planning and Operation in the Metropolitan Region of São Paulo: Worst Drought in History, Conflicts, Response, and Resilience.” *World Environmental and Water Resources Congress 2015*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2226–2235, 2015.
15. Talukdar, B., Deb, D., and Srivastava, D. K.. “Development of Multiobjective Stochastic Dynamic Programming (MOSDP) Reservoir Operation Model.” *World Environmental and Water Resources Congress 2012*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 985–997, 2012.
16. U.S. Army Corps of Engineers. *Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs*. EM1110-2-1420, Washington, DC, 2018.
17. Zhu, X., Zhang, C., Yin, J., Zhou, H., and Jiang, Y.. “Optimization of Water Diversion Based on Reservoir Operating Rules: Analysis of the Biliu River Reservoir, China.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(2), 411–421, 2014.