

IV-121 - SIMULAÇÃO DE REGRA OPERATIVA DO SISTEMA CANTAREIRA OBTIDA ATRAVÉS DE MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA UM PERÍODO CRÍTICO DE VAZÕES

Camila Billerbeck⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestranda em Engenharia de Recursos Hídricos pela Escola Politécnica (EP/USP).

Arisvaldo Vieira Mello Junior⁽²⁾

Professor Dr. Escola Politécnica (EP/USP), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

Endereço⁽¹⁾: Av. Prof. Almeida Prado, 83 - Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP: 05508-900 - Brasil.
Tel: (11) 3091-5549 - e-mail: camila.billerbeck@usp.br

RESUMO

O Sistema Cantareira (SC) enfrentou um período de forte seca entre os anos de 2013 e 2014, comprometendo o abastecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo, (RMSP), e das bacias a jusante. A otimização de reservatórios envolve grandes desafios, no entanto é fundamental para gestão de sistemas de recursos hídricos, especialmente em eventos críticos. O objetivo deste trabalho é verificar o desempenho de uma regra de operação otimizada para o reservatório equivalente (RE) do SC por meio do sistema de suporte à decisões (SSD) AcquaNet. A regra operativa foi obtida por meio da análise das curvas de permanência dos resultados de um modelo de otimização por Programação Dinâmica (PD) determinística, calculado pelo software CSUDP que considerou um período de vazões afluentes críticas. A regra apresentou um desempenho eficiente do modelo quanto ao volume final de armazenamento do RE e quanto à garantia de atendimento às demandas ao longo da série histórica considerada.

PALAVRAS-CHAVE: Operação de reservatórios, Programação Dinâmica, CSUDP, AcquaNet.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Sistema Cantareira (SC) é um dos principais sistemas produtores de água do Brasil, com capacidade para fornecer 33 m³/s destinados ao abastecimento de mais de 9 milhões de pessoas da região metropolitana de São Paulo (RMSP) e de mais de 3 milhões de habitantes em regiões nas bacias à jusante. O SC é composto por seis reservatórios, o Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras, interligados por túneis e canais, responsáveis por conduzir as águas da bacia do rio Piracicaba para a bacia do Alto Tietê, de onde são levadas para tratamento na ETA Guaraú, uma das maiores estações de tratamento da América Latina (ANA e DAEE, 2016).

Entre os anos de 2013 e 2014 houve significativas reduções de precipitação em regiões brasileiras que afetaram diretamente os níveis de armazenamento de reservatórios do semiárido brasileiro e de áreas metropolitanas com grande demanda hídrica (São Paulo e Rio de Janeiro). Estes eventos comprometeram o abastecimento público e setores como irrigação e geração de energia. O Sistema Cantareira (SC) sofreu grandes impactos neste período, o que causou dificuldades no abastecimento de água para a RMSP e para as bacias a jusante. Eventos como estes refletem a importância de ferramentas que auxiliem o processo decisório na operação de sistemas de reservatórios, para lidar com problemas dessa natureza, especialmente diante de períodos críticos de vazões.

A operação otimizada de reservatórios apresenta grandes desafios técnicos, porém torna-se fundamental para a melhoria dos sistemas existentes de forma a conciliar eficiência econômica, sustentabilidade e equidade, considerando seus múltiplos usos. Neste sentido, modelos de otimização e de simulação de reservatórios tem sido explorados em literatura acadêmica (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; PORTO et al, 1997). Dentre as técnicas de otimização aplicadas a reservatórios, a programação dinâmica (PD) é uma das mais populares, por ser conveniente para resolver problemas decisórios sequenciais em estágios, e por permitir que a não linearidade seja incorporada à modelagem (YAKOWITZ, 1982). Labadie (2004) aponta que diferentemente da otimização, as técnicas de simulação permitem verificar o desempenho dos sistemas perante diferentes estratégias de gestão, daí a vantagem da combinação das duas técnicas em análises de sistemas de reservatórios.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de verificar o desempenho de uma regra de operação otimizada para o reservatório equivalente (RE) do SC em termos da garantia de atendimento às demandas e dos volumes finais armazenados, por meio do sistema de suporte à decisões (SSD) AcquaNet. A regra operativa foi obtida por meio da análise das curvas de permanência dos resultados de um modelo de PD determinística do SC, calculado pelo software CSUDP que considerou um período de vazões afluentes críticas.

METODOLOGIA

O trabalho foi realizado em duas etapas. Na primeira, foi desenvolvido um modelo de otimização para o SC por meio de PD determinística, calculado pelo software CSUDP tendo como base o período de 2011 a 2015, que contém o biênio crítico (2013 e 2014). Na segunda etapa, com base nos resultados de atendimento às demandas, e de volumes finais de armazenamentos do modelo otimizado foi obtida uma regra operativa para o sistema. Esta regra foi simulada para a série histórica (1982 a 2016) com auxílio do sistema de suporte a decisões (SSD) AcquaNet. A seguir são apresentadas as metodologias em cada etapa.

PRIMEIRA ETAPA: MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA DETERMINÍSTICA

Um problema de otimização por PD envolve estágios, estados e decisões. Cada estágio possui um número de estados e decisões possíveis, e a mudança de estado do sistema ocorre a partir das decisões tomadas (LOUCKS e van BEEK, 2005). Em aplicações para operação de reservatórios, é usual definir o armazenamento do sistema como a variável de estado, a vazão de descarga como a variável de decisão e os períodos de tempo como estágios (SIMONOVIC, 1992). A PD é baseada no “princípio da otimalidade” que é incorporado ao modelo de otimização por meio da função recursiva. Esta função acumula as soluções ótimas a cada estágio sucessivamente, até gerar uma política decisória que atenda a função objetivo, podendo ser escrita nas formas progressiva ou regressiva (LABADIE, 2004; LOUCKS e van BEEK, 2005).

Em sistemas de múltiplos reservatórios, as combinações a serem calculadas aumentam exponencialmente, este fenômeno é conhecido como o “mal da dimensionalidade”, característica que torna a determinação do ótimo global mais complexa (NANDALAL e BOGARDI, 2007). Um dos artifícios utilizados para lidar com a multidimensionalidade é a discretização das variáveis, que origina a PD discreta, que gera resultados suficientemente satisfatórios para análises práticas (LOUCKS e van BEEK, 2005). Outros recursos são algoritmos específicos de cálculo, como a PD incremental (IDP) e PD por aproximações sucessivas (DPSA). Ambas as técnicas baseiam-se em processos iterativos em torno de uma solução inicial fornecida pelo usuário, a chamada “trajetória inicial” (YEH, 1985). A combinação destes algoritmos possibilita a convergência rápida para a solução ótima local seguida do refinamento e/ou confirmação do resultado, artifício utilizado como estratégia para o tratamento de problemas multidimensionais (LABADIE, 2014).

Em geral os problemas de PD com mais de uma variável de decisão envolvem muitos cálculos, o que pode desencorajar sua aplicação, além disso, umas das principais dificuldades da PD é a modelagem do sistema de otimização em si. Neste contexto, o software CSUDP desenvolvido por Labadie (2014) é uma alternativa de livre acesso com grande potencial para resolução de problemas pela PD discreta. O programa possibilita a resolução de modelos de PD determinísticos unidimensionais e multidimensionais. Por meio de sua interface, é possível configurar características do problema como o tipo de resolução progressivo ou regressivo; o número de estágios, as discretizações e os limites de restrição das variáveis de estado e de decisão.

Para os cálculos, a função objetivo e a função de transformação de estado devem ser programadas pelo usuário em linguagem C na própria interface do software, além de uma função auxiliar, que permite a leitura de dados suplementares em um arquivo externo caso necessário. Estas funções são programadas na linguagem C e compiladas pelo próprio software que gera um arquivo executável específico para cada problema. A cada estágio é chamada a função de transformação de estado e a função de leitura de dados externos se houver necessidade, de modo que resultados são gravados e utilizados para cálculos subsequentes à chamada da função objetivo (LABADIE, 2014). A Figura 1 mostra a interface do CSUDP.

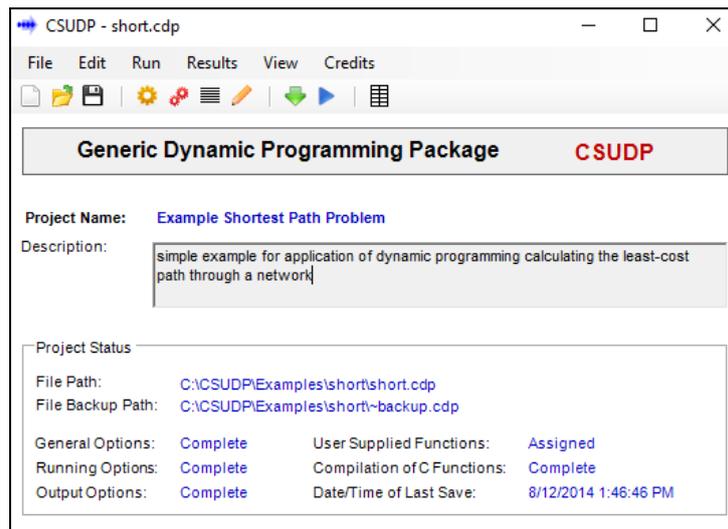


Figura 1: Interface do software CSUDP.

O programa permite que problemas unidimensionais de PD sejam resolvidos nas formas progressiva ou regressiva, e que os problemas multidimensionais sejam resolvidos através dos algoritmos da IDP, da DPSA e da combinação de ambos, o que garante melhor convergência do resultado. O CSUDP permite que a “trajetória inicial” para o problema seja obtida automaticamente a partir dos valores médios fornecidos para os limites máximo e mínimo das variáveis de estado, o que fornece bons resultados práticos para as primeiras aproximações do problema. A seguir será descrito o modelo de PD proposto para o Sistema Cantareira.

Em vista dos eventos de baixas precipitações ocorridos entre 2013 e 2014, as negociações para renovação da outorga do SC cogitaram, entre outros aspectos, a inclusão de três pontos de controle para verificação das vazões liberadas pela operação do sistema; um no rio Jaguari medido em Buenópolis, um no rio Atibaia medido em Valinhos, e o outro na estação elevatória de Santa Inês para atendimento da RMSP. Neste contexto, o SC foi representado por um único reservatório equivalente (RE) com três variáveis de decisão que correspondem a estes pontos de controle, conforme mostra a Figura 2.

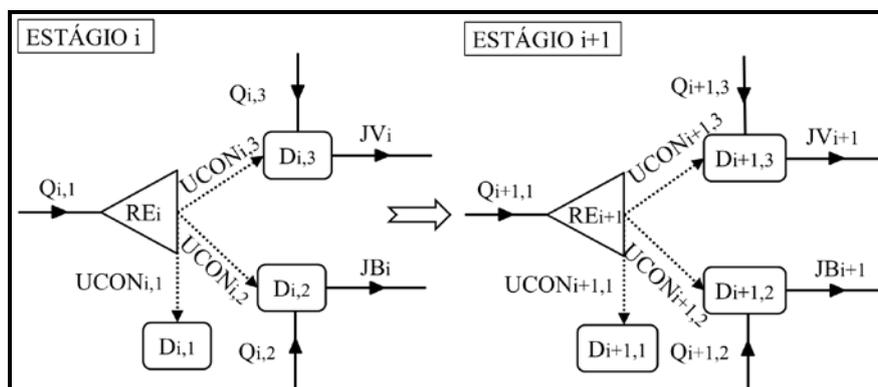


Figura 2: Rede em fluxo do reservatório equivalente do SC.

Em que: i representa o estágio (mês); RE_i (hm^3) corresponde ao volume armazenado pelo reservatório equivalente do SC; $Di_{i,1}$, $Di_{i,2}$ e $Di_{i,3}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) correspondem às variáveis de decisão, sendo respectivamente o fornecimento para a RMSP, o ponto de controle para medições de vazão em Buenópolis, e o ponto de controle para medições de vazão em Valinhos; $Qi_{i,1}$, $Qi_{i,2}$ e $Qi_{i,3}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) correspondem às vazões médias afluentes ao RE, ao ponto de controle em Buenópolis e ao ponto de controle em Valinhos, respectivamente; $UCON_{i,1}$, $UCON_{i,2}$ e $UCON_{i,3}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) correspondem às descargas para RMSP, e para pontos de controle Valinhos e Buenópolis respectivamente (hm^3), e JV_i e JB_i ($m^3 \cdot s^{-1}$) são as vazões de jusante dos pontos de controle Valinhos e Buenópolis, respectivamente.

O software CSUDP foi empregado para resolução do problema de otimização considerando 60 estágios, que correspondem aos meses do período entre janeiro de 2011 a dezembro de 2015 com base nas vazões naturais médias mensais mostradas na Figura 3.

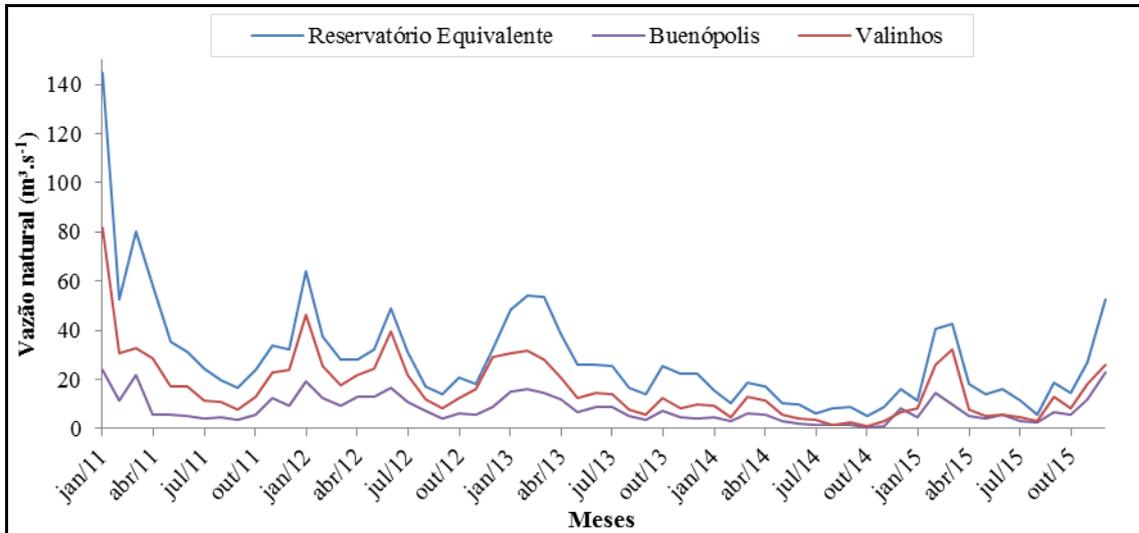


Figura 3: Vazões afluentes ao RE e aos pontos de controle entre janeiro de 2011 a dezembro de 2015.

A função objetivo (equação 1) foi formulada em termos do atendimento às demandas do sistema, penalizando o não atendimento à RMSP (equação 2).

$$F_{obj} = \min \left\{ \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^3 K \cdot (UCON_{i,j} - D_{i,j} \cdot 2,628)^2 \right\} \quad \text{equação (1)}$$

$$K = \begin{cases} 100 & p/j = 1 \text{ se } UCON_{i,1} < D_{i,1} \\ 0 & p/j = 1 \text{ se } UCON_{i,1} \geq D_{i,1} \\ 1 & p/j = 2, 3 \end{cases} \quad \text{equação (2)}$$

Em que j é o indicador da variável de decisão; T é o limite superior do estágio (mês). A função de transformação de estado em modelos de otimização para operação de reservatórios é o balanço de massa do sistema, conforme as equações 3, 4 e 5.

$$UCON_{i,1} = RE_i - RE_{i+1} + Q_{i,1} \cdot 2,628 - UCON_{i,2} - UCON_{i,3} \quad \text{equação (3)}$$

$$JB_i = Q_{i,2} \cdot 2,628 + UCON_{i,2} \quad \text{equação (4)}$$

$$JV_i = Q_{i,3} \cdot 2,628 + UCON_{i,3} \quad \text{equação (5)}$$

As restrições do modelo são fornecidas pelas equações 6 a 9. A equação 6 descreve a restrição de capacidade máxima do RE em função dos meses. Entre os meses de outubro a abril uma parcela do volume foi reservada considerando o controle de cheias, esta condição foi incorporada ao modelo. A equação 7 descreve as restrições de passagem de vazão nos pontos de controle, e as equações 8 e 9 indicam as restrições referentes às variáveis de decisão. Os valores requeridos e limites para as restrições estão dados pela Tabela 1.

$$RE_{i,min} \leq RE_i \leq RE_{i,max} \quad \text{equação (6)}$$

$$D_{i,j} \geq D_{i,j,min} \quad p/j = (2, 3) \quad \text{equação (7)}$$

$$\sum_{j=1}^3 UCON_{i,j} \leq RE_i + Q_{i,1} \quad \text{equação (8)}$$

$$UCON_{i,j,\min} \leq UCON_{i,j} \leq UCON_{i,j,\max} \quad \text{equação (9)}$$

Tabela 1: Volumes do reservatório equivalente e restrições do modelo.

VOLUME DO RE (hm ³)	INICIAL	MÍN.	MÁX.
Volume útil - meses secos (maio a setembro)	-----	-----	981,56
Volume útil - meses chuvosos (outubro a abril)	-----	0,00	942,30
Estado inicial (jan/2011)	911,53	0,00	-----
DEMANDAS (m ³ .s ⁻¹)	REQUERIDA	MÍN.	MÁX.
RMSD (D _{i,1})	33,00	-----	-----
Buenópolis (D _{i,2})	2,50	0,25	15,00
Valinhos (D _{i,3})	16,00	0,35	48,00
VARIÁVEIS DE DECISÃO (m ³ .s ⁻¹)		MÍN.	MÁX.
UCON _{i,1}		0,00	33,00
UCON _{i,2}		0,25	15,00
UCON _{i,3}		0,35	48,00

SEGUNDA ETAPA: OBTENÇÃO E SIMULAÇÃO DA REGRA OPERATIVA

O modelo otimizado fornece subsídios para obtenção de regras operativas do sistema. Para isso, uma das possibilidades é a obtenção de faixas de operação e descargas. No modelo em estudo, os resultados de volumes finais armazenados e das vazões nos pontos de controle ao final de cada mês do período, foram normalizados conforme a equação 10 para obtenção dos pontos das curvas de permanência normalizadas. Através da análise desta curva foram determinadas as principais faixas de operação do SC e uma regra de vazões fornecidas para os pontos de controle em cada faixa.

$$z_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{equação (10)}$$

Em que z é o valor normalizado da variável em cada curva de permanência, x_i é a variável da otimização inicial, x_{\min} e x_{\max} referem-se respectivamente aos menores e maiores valores da série.

Para verificar os impactos da regra otimizada de operação no SC ao longo dos diversos cenários de vazão afluente, o modelo proposto foi simulado com auxílio do SSD AcquaNet. O AcquaNet é um SSD desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões da Escola Politécnica da USP (LabSid), que combina técnicas de simulação e otimização apresentando-se como uma poderosa ferramenta no auxílio da tomada de decisões em sistemas de recursos hídricos representados em redes de fluxo. PORTO et al, 2005; LABSID, 2015). O programa possui uma estrutura modular composta por um módulo base e por módulos para cálculos diversos de problemas de sistemas de recursos hídricos. A Figura 4 mostra a interface do módulo base do SSD AcquaNet.

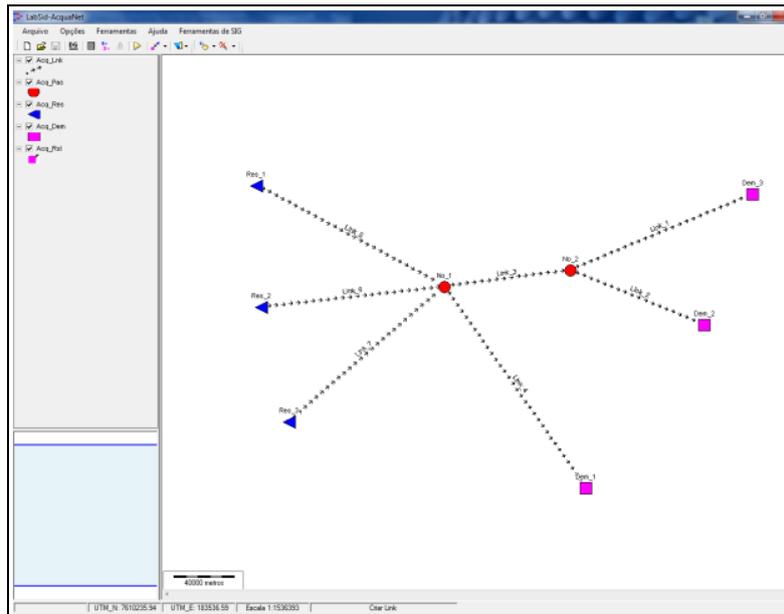


Figura 4: Interface do SSD AcquaNet.

O AcquaNet tem duas opções para efetuar as simulações, o modo “Simulação Contínua”, ou estatisticamente no modo chamado “Planejamento Tático”. Quanto às opções de cálculo, estão disponíveis os modos “Estados Hidrológicos” e “Calibração”. Na primeira opção o modelo considera a quantidade de água armazenada nos reservatórios para determinar qual o valor de demanda, de volume meta e as prioridades que serão utilizadas no cálculo de cada um dos meses. Já na segunda, o modelo efetua os cálculos com os valores fornecidos sem considerar o estado atual do sistema (LABDSID, 2015). A simulação proposta é baseada na simulação contínua ao longo da série histórica no período de 1982 a 2016, por meio de estados hidrológicos obtidos pela regra otimizada. A Figura 5 mostra as vazões naturais utilizadas para a simulação.

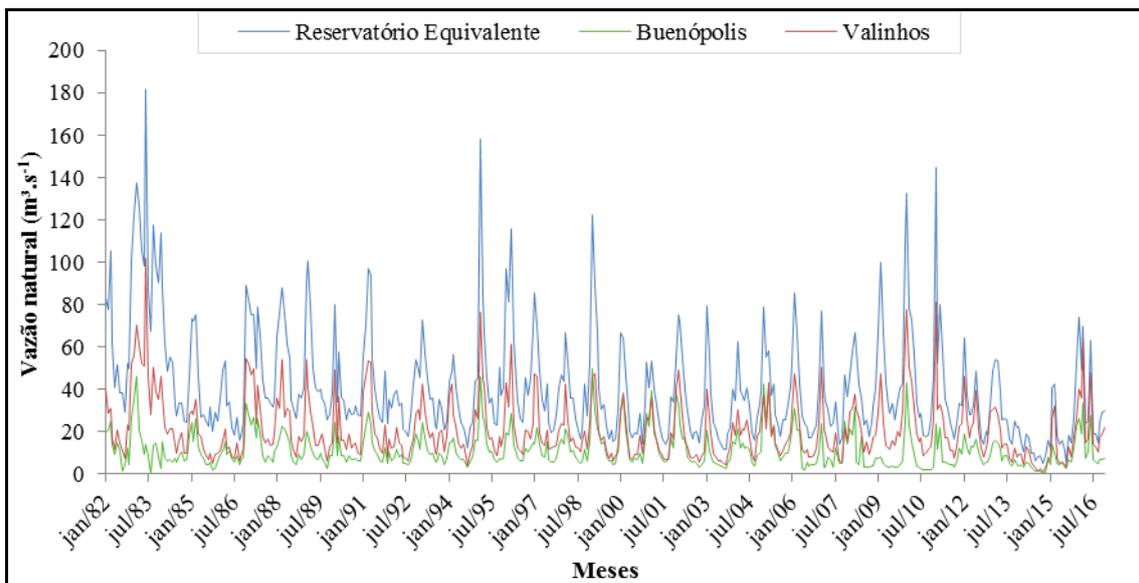


Figura 5: Vazões naturais do RE e dos pontos intermediários entre 1982 e 2016.

RESULTADOS OBTIDOS

O modelo otimizado (Etapa 1) representa o melhor desempenho possível do RE do sistema Cantareira durante o período entre 2011 a 2015. Os resultados de volume final armazenado e de vazão fornecida para as demandas foram normalizados com base na equação 10, e geraram as curvas de permanência normalizadas mostradas na Figura 6. Os valores extremos para a equação 10 são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores máximos e mínimos dos resultados obtidos pela otimização livre para normalização.

SÉRIE	x_{\min}	x_{\max}
Volume final (hm ³)	0	981,56
Fornecimento para RMSP (m ³ .s ⁻¹)	27,21	33,00
Fornecimento para Buenópolis (m ³ .s ⁻¹)	0,75	2,50
Fornecimento para Valinhos (m ³ .s ⁻¹)	1,74	16,00

As faixas operativas para a regra otimizada foram definidas pela observação da curva de permanência normalizada do atendimento às demandas e dos volumes finais armazenados, na qual verificam-se três comportamentos bem definidos, nas faixas até 30%, entre 30% e 80% e acima de 80% do volume útil. A otimização oferece boas garantias de atendimento às demandas de Valinhos e de Buenópolis devido às contribuições naturais intermediárias. Em Buenópolis, o modelo otimizado garante a vazão requerida total durante mais de 90% do período, enquanto para Valinhos é garantida a demanda total durante 40% do período. As curvas de permanência normalizadas para a RMSP formam patamares que indicam fornecimentos entre 27,21 m³.s⁻¹ a 28,69 m³.s⁻¹ nas faixas até 25% do volume útil do RE; entre 28,69 m³.s⁻¹ a 32,15 m³.s⁻¹ nas faixas entre 25% e 85% do volume útil, e de 32,15 m³.s⁻¹ a 32,65 m³.s⁻¹ nas faixas de armazenamento entre 85% e 96% aproximadamente do volume útil.

A análise conjunta destas informações, especialmente quanto ao atendimento para a RMSP originaram quatro faixas operação sintetizadas na Tabela 3. Essas faixas foram definidas de modo a preservar o comportamento do modelo otimizado durante a simulação na série histórica. As demandas requeridas em cada faixa são baseadas em cenários possíveis cogitados no processo de renovação da outorga do SC.

Tabela 3: Proposta de regra otimizada de fornecimento de vazões por faixas de volume útil e período.

FAIXA DE OPERAÇÃO	PERÍODO	RMSP (m ³ .s ⁻¹)	VALINHOS (m ³ .s ⁻¹)	BUENÓPOLIS (m ³ .s ⁻¹)
100% a 95% - Faixa 1	Seco	33,00	20,00	3,00
	Úmido		16,00	2,50
95% a 85% - Faixa 2	Seco	32,00	18,00	3,00
	Úmido		14,00	2,50
85% a 30% - Faixa 3	Seco	29,00	18,00	2,50
	Úmido		14,00	2,00
30% a 0% - Faixa 4	Seco	28,00	16,00	2,50
	Úmido		12,00	2,00

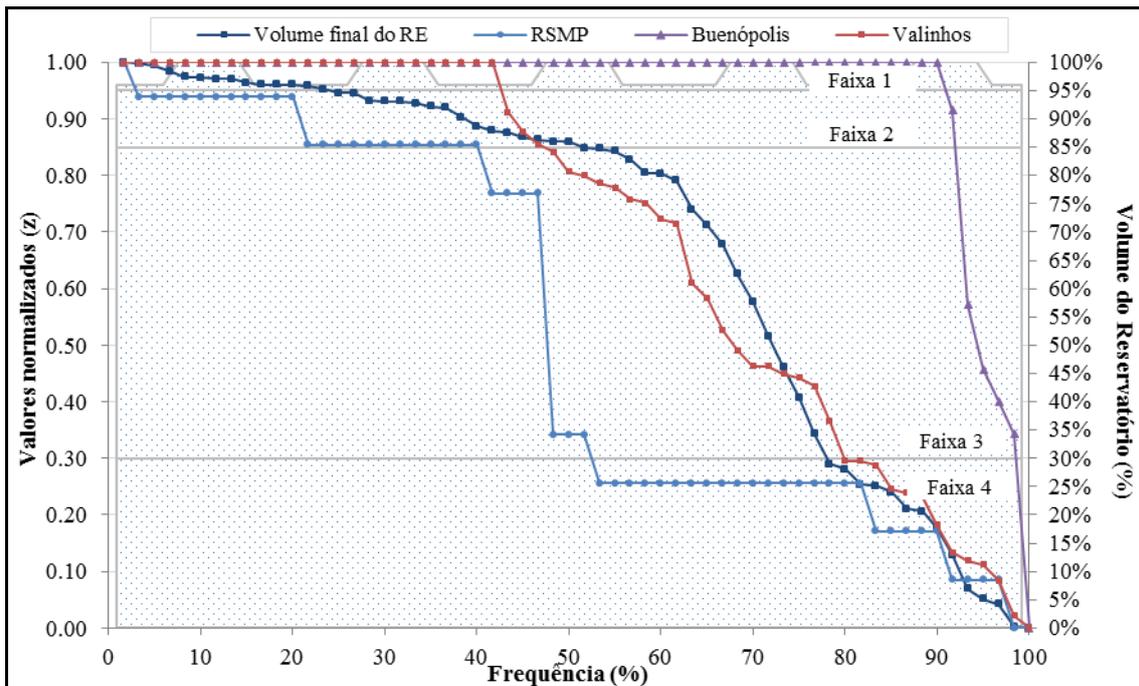


Figura 6: Resultados normalizados do modelo de otimização e faixas de operação propostas para a regra otimizada.

A regra de operação foi simulada no software AcquaNet, por meio dos “Estados Hidrológicos”. Cada faixa de operação resulta em um estado hidrológico, sendo possível definir valores requeridos das respectivas demandas. O AcquaNet seguiu a lógica da regra operativa, considerando apenas volume útil do sistema e seus resultados são apresentados na Figura 7, em termos dos volumes finais armazenados do RE, e nas Figuras 8 e 9 em termos das vazões fornecidas para as demandas.

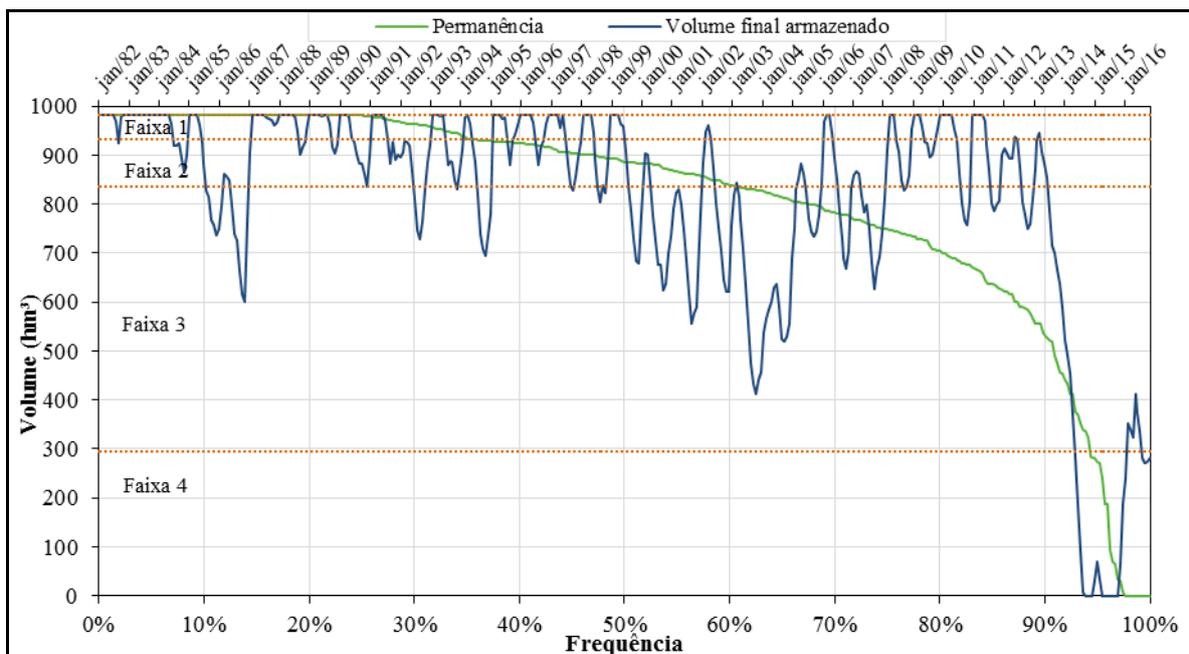


Figura 7: Desempenho e permanência de volumes finais armazenados entre janeiro/1982 a dezembro/2016.

Os resultados obtidos para os volumes finais armazenados indicam que em geral a tendência do modelo foi de manter o armazenamento do RE elevado, durante 60% do período analisado o RE operou entre as Faixas 1 e 2,

e a operação na Faixa 4, ocorreu durante 6% do período da série. Os impactos das baixas afluências são visíveis no desempenho do modelo, com o RE atingindo o esgotamento do volume útil durante 11 meses; entre novembro de 2014 e fevereiro de 2015, e entre junho e dezembro de 2015. Durante os eventos críticos, a operação realizada também esgotou o volume útil, havendo a necessidade de recorrer aos volumes de reserva técnica durante 17 meses entre julho de 2014 até novembro de 2015 (ANA e DADEE, 2016).

As Figuras 8 e 9 mostram o desempenho do modelo em relação ao fornecimento de vazões para as demandas.

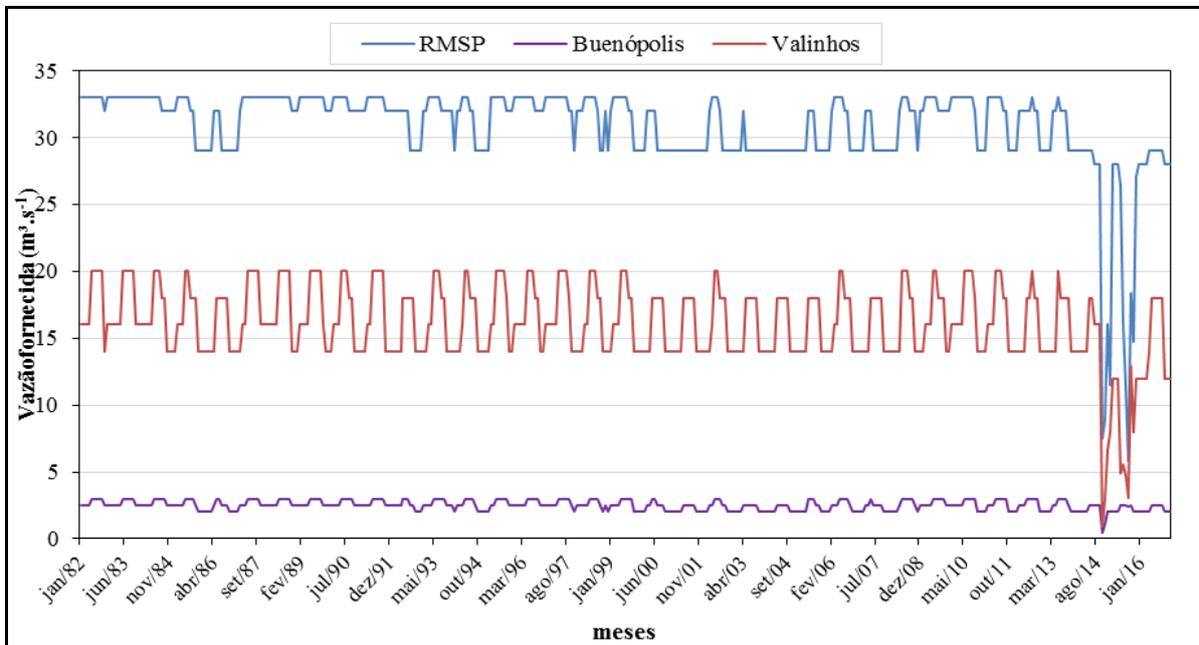


Figura 8: Vazões fornecidas para RMSP, Buenópolis e Valinhos entre janeiro/1982 a dezembro/2016.

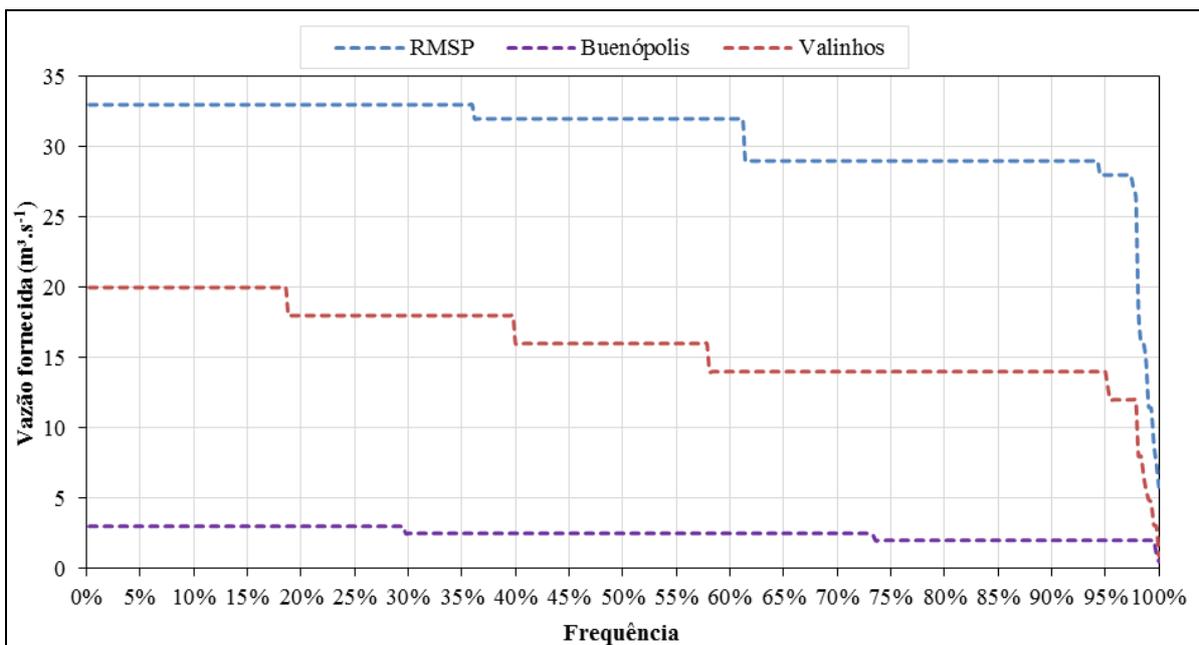


Figura 9: Permanência das vazões fornecidas para RMSP, Buenópolis e Valinhos.

Na Figura 8 é possível verificar as variações de demanda requerida pela regra (Tabela 3) ao longo da série, em função do mês e dos volumes iniciais de armazenamento do RE. Até setembro de 2014 houve atendimento total das demandas requeridas, mesmo com o reservatório alcançando níveis baixos de armazenamento. Entre

outubro de 2014 e dezembro de 2015 o modelo não foi capaz de atender as demandas requeridas totais para a Faixa 4 de operação, devido aos impactos das baixas vazões naturais. A Figura 9 mostra as curvas de permanência de atendimentos da Figura 8, evidenciando que apesar dos impactos do período crítico, a regra apresentou garantia de atendimento total às demandas requeridas de 99% do período para Buenópolis, de 98% do período para Valinhos, e de 97% do período para a RMSP.

A Figura 10 apresenta em detalhe os déficits de atendimento pelo modelo, em termos da porcentagem de demanda fornecida com relação à demanda requerida no período de outubro de 2014 a dezembro de 2015, enquanto o RE esteve na Faixa 4. A demanda de Valinhos foi a que sofreu o maior impacto quanto ao atendimento, chegando a 8% da demanda meta para o mês de outubro de 2014. Buenópolis sofreu o menor impacto, com o fornecimento de 25% da demanda meta no mesmo mês. Para a RMSP o maior déficit gerado pelo modelo ocorreu em agosto de 2015, com o fornecimento de 21% da demanda meta ($5,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

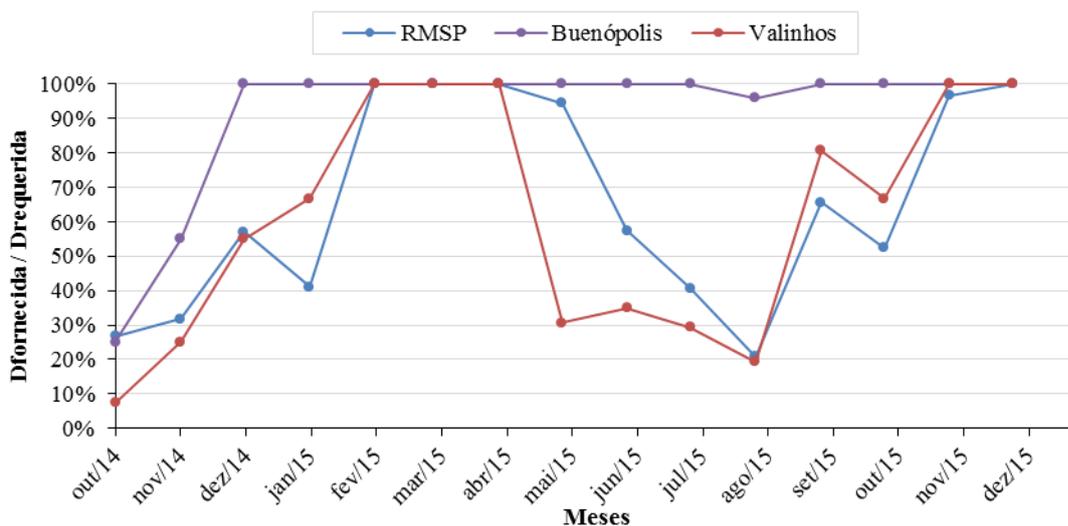


Figura 10: Porcentagem de demanda fornecida com relação à demanda requerida pelo modelo no período de outubro de 2014 a dezembro de 2015.

Embora as garantias de atendimento das demandas tenham sido acima de 97%, o modelo indica que poderão ocorrer déficits significativos e sucessivos no abastecimento. A regra obtida é diretiva para operação do sistema, não fornecendo previsões para o processo decisório em eventos prolongados de baixas afluências. Na prática, a operação deverá ser conservadora, pois pode não haver volume disponível para o abastecimento total da demanda requerida. No SC, por exemplo, quando o RE se encontra na Faixa 4 a regra indica a retirada de $28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para RMSP, em determinados meses não será possível dispor desta vazão, como mostra a Figura 10. Modelos que incorporam previsão de vazões podem suprir esta característica de modelos determinísticos, de modo a possibilitarem o conhecimento das condições posteriores do sistema após as tomadas de decisão, minimizando antecipadamente, os riscos de déficits significativos ou prolongados no abastecimento das demandas.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O modelo de PD foi capaz de representar convenientemente o problema de otimização do SC através de um reservatório equivalente. O software CSUDP empregado para a solução do problema de otimização multidimensional, apresentou bom desempenho computacional para esta aplicação. O resultado do modelo otimizado representa o melhor desempenho possível do sistema para o período de 2011 a 2015, comportamento que procurou ser representado e introduzido ao na representação do sistema por meio do software AcquaNet ao longo da série por meio de uma regra operativa.

Os resultados da PD oferecem subsídios para obtenção de regras operativas baseadas em diversas metodologias. A metodologia adotada para definir as faixas operacionais e as vazões requeridas em cada

demanda resultou numa regra prática e de fácil incorporação no software AcquaNet. As demandas requeridas bem como as faixas operativas são fundamentais para o desempenho do modelo ao longo da série.

Os resultados da regra operativa mostraram altas garantias quanto ao atendimento das demandas totais, de mais de 97% de fornecimento da demanda meta ao longo da série analisada (1982 a 2016) para a RMSP, Buenópolis e Valinhos. Apesar da alta garantia de abastecimento, o modelo não foi capaz de impedir períodos de déficits significativos com relação à demanda meta entre os meses de outubro de 2014 a dezembro de 2015, período que sofreu impacto das baixas vazões naturais. Na prática, a operação deve ser conservadora quando o RE estiver em faixas críticas de volume útil, como na Faixa 4. No entanto, a análise determinística gerou um desempenho significativo para o sistema, por não contar com o volume disponível da reserva técnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA - Agência Nacional de Águas; DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. Dados de referência acerca da outorga do sistema Cantareira. 2016. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sof/Renovacao_Outorga/DDR_Sistema_Cantareira.pdf>. Acesso em 16 fev. 2017.
2. LABADIE, J.W. *Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.130, n.2, p.93–111, Mar, 2004.
3. LABADIE, J.W. Generic Dynamic Programming Package: CSUDP - Documentation and User Guide. 2014. Disponível em: <http://modsim.engr.colostate.edu/csudp_download.php>. Acesso em 16 fev. 2017.
4. LABSID – Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (USP). AcquaNet - Manual do AcquaNet 2013. jul. 2015. Disponível em: <<http://www.labsid.eng.br/software/ManualAcquaNet2013.pdf>>. Acesso em 16 fev. 2017.
5. LOUCKS, D.P. BEEK, E. *Water Resources Systems Planning and Management - An Introduction to Methods, Models and Applications*. Paris: UNESCO, 2005.
6. NANDALAL, K.D.W.; BOGARDI, J.J. *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs - Application and Limits*. United States: Cambridge University Press, 2007.
7. PORTO, R.L.; LANNA, A.E.L.; BRAGA, P.F.B.; CIRILO, J.A.; ZAHED, K.; AZEVEDO, L.G.T.; GOBETTI, L.; BARROS, M.T.L.; BARBOSA, P.S.F. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.
8. SIMONOVIC, S.P. *Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.118, n.3, p.262–280, May, 1992.
9. YAKOWITZ, S. *Dynamic Programming Applications in Water Resources*. *Water Resources Research*, v.18, n.4, p.673–696, Aug. 1982.
10. YEH, W. G. W. *Reservoir management and operation models: a state-of-the-art Review*. *Water Resources Research*, v.21, n.12, p.1797–1818, Dec. 1985.