

## IV-118 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA OCASIONADA PELO ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA

**Victor de Barros Deantoni<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Campinas. Mestre em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais pela Universidade Estadual de Campinas (FEC/UNICAMP). Professor da área de Hidráulica na PUC-Campinas. Doutorando em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais pela Universidade Estadual de Campinas (FEC/UNICAMP)

**Alberto Luiz Francato<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP, Mestre em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos, Doutor em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos, pela FEC/UNICAMP, Livre Docente na área de Planejamento Energético e Sistemas Elétricos pela FEC/UNICAMP. Professor da FEC/UNICAMP

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Santo Antônio, 35 – Jd. Santo Antônio - Itatiba - SP - CEP: 13253-200 - Brasil - Tel: +55 (11) 94117-8150 - e-mail: [vbdeantoni@gmail.com](mailto:vbdeantoni@gmail.com)

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Av. Albert Einstein, 951- Cidade Universitária – Campinas – SP – CEP: 13083970 - Brasil – e-mail: [francato@fec.unicamp.br](mailto:francato@fec.unicamp.br)

### RESUMO

A utilização de água para abastecimento público é prioritário sobre seus demais usos, em situações de crise, onde o bem está em falta, a geração de energia elétrica em hidrelétricas pode ser afetada por diferentes padrões de consumo. Foi desenvolvido um modelo que utiliza a otimização não linear com o objetivo de avaliar, para diferentes valores de consumo (Uso Consuntivo), qual o impacto na geração de energia elétrica em uma usina hidrelétrica. Para avaliar o modelo e seus resultados ele foi aplicado na bacia da UHE Barra Bonita, no estado de São Paulo, considerando cenários, desde a redução de 50% no consumo como o aumento de 100% no consumo. Os valores obtidos mostram que esse impacto é da ordem de redução de 0,5% ao aumento de 0,24%, para cenários estatísticos considerados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Otimização, Operação de Reservatórios, Planejamento da operação, Abastecimento Urbano de água, Geração de Energia Elétrica.

### INTRODUÇÃO

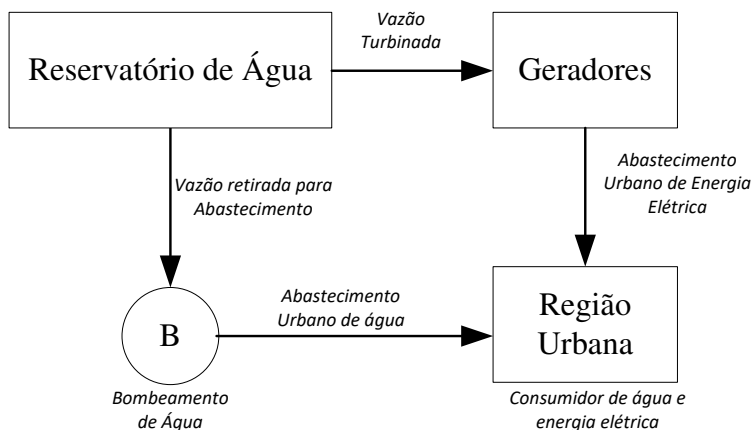
Diversos são os usos da água em uma bacia hidrográfica, os mais importantes estão associados ao abastecimento das populações, mas destacam-se também usos de grande importância para a sociedade como a geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas. As políticas de operação dos reservatórios ainda podem ser influenciadas pela navegação e restrições de vazão ecológica (vazão mínima).

O Gerenciamento de recursos hídricos em geral envolve a tomada de decisão sobre variáveis que impactam o meio ambiente, a economia e a sociedade. É comum que esses aspectos estejam em situações de conflito, isto é a alteração de uma variável influencia em mais de um objetivo. Utilizando um modelo de tomada de decisão com suporte na otimização não linear procura-se avaliar o impacto na geração de energia elétrica, ocasionado pela operação de um único reservatório, em função de diferentes cenários de retirada de água para abastecimento urbano.

O modelo de otimização proposto considera as principais variáveis envolvidas na geração de energia elétrica em uma usina hidrelétrica, considerando todos os dados disponíveis pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Como a retirada de água é prioritária sobre os outros usos ela é modelada como uma restrição, deste modo sempre deve ser atendida para que a solução seja admitida como factível.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho fundamenta-se em um modelo para tomada de decisão que utiliza a otimização não linear e multiobjectivo para avaliar o impacto sobre os diferentes usos da água em uma bacia hidrográfica.



**Figura 1: Produção de energia elétrica e suprimento hídrico proveniente de um único reservatório.**

A metodologia para construção do modelo consiste em determinar uma função objetivo que contemple a geração de energia elétrica em usinas hidroelétricas e também o uso da água para abastecimento, apresenta-se abaixo a modelagem, que segue a linha apresentada em (DEANTONI, 2013) e (ZAMBOM, 2003).

Função objetivo utilizada:

$$\min Z = \sum_{t=1}^{24} dt_t * (P_t - D_t) \quad \text{Equação (1)}$$

Equação da continuidade em usinas com reservatório:

$$S_t = S_{t-1} + dt * (R_t + I_t - R_t - UC_t) - E_t \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo que a vazão total  $R_t$  é dada por:

$$R_t = R'_t + R''_t \quad \text{Equação (3)}$$

Acima são utilizadas as seguintes variáveis:  $Z$  é a função objetivo,  $dt_t$  é o intervalo de tempo considerado (número de segundos no mês),  $P_t$  é a Produção de Energia elétrica no intervalo de tempo,  $D_t$  é a demanda por energia no intervalo de tempo,  $I_t$  é a vazão natural afluyente na usina ( $m^3/s$ );  $R_t$  é a vazão total descarregada ( $m^3/s$ ) que é composta por três vazões:  $R'_t$  a vazão turbinada na usina ( $m^3/s$ );  $R''_t$  a vazão vertida na usina ( $m^3/s$ );  $UC_t$  é o uso consuntivo para a água retirada do reservatório (finalidade abastecimento e  $E_{i,t}$  é a evaporação média ( $hm^3$ ) na área do espelho d'água do reservatório.

O armazenamento em cada intervalo de tempo ( $t$ ) é dado por  $S_{i,t}$ . A evaporação ( $E_{i,t}$ ), em usinas com reservatório, pode ser calculada pela equação 4, que leva em consideração a área ( $A_{i,t}$ ) média do espelho d'água no intervalo de tempo multiplicada pela taxa de evaporação mensal ( $IE_i$ ):

$$E_t = \frac{A_t + A_{t-1}}{2} * IE \quad \text{Equação (4)}$$

Para usinas fio d'água a área do espelho possui pequena variação e pode ser considerada constante:

$$E_t = A_t * IE \quad \text{Equação (5)}$$

A queda bruta, para uma usina com reservação, pode ser calculada de acordo com:

$$Hb_t = \frac{H_t + H_{t-1}}{2} - H_{t_j} \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo  $Hb_t$  o valor da queda bruta (m), para o intervalo de tempo  $t$ ;  $H_t$  é a cota do reservatório, montante (m) e  $H_{t_j}$  a cota de jusante (m). A produção energética é dada por:

$$P_{i,t} = \varepsilon * Hb_{i,t} * R_{i,t} \quad \text{Equação (7)}$$

Em que  $P_{i,t}$  é a produção de Energia no intervalo de tempo  $t$ ;  $\varepsilon$  é a produtividade da usina em estudo.

Altura do nível de água no lago

$$H_{i,t} = a_0 + a_1 * S_t + a_2 * S_t^2 + a_3 * S_t^3 + a_4 * S_t^4 \quad \text{Equação (8)}$$

Em que os valores de  $\alpha$  são coeficientes de um polinômio que em função do armazenamento  $S_{i,t}$  permite o cálculo da cota de montante (m). Altura de jusante

$$H_{t_j} = b_0 + b_1 * R_t + b_2 * R_t^2 + b_3 * R_t^3 + b_4 * R_t^4 \quad \text{Equação (9)}$$

Em que os valores de  $b$  são coeficientes de um polinômio que em função da vazão  $R_{i,t}$  permite o cálculo da cota de jusante (m) no canal de fuga. Também é possível realizar o cálculo da área alagada:

$$A_t = c_0 + c_1 * H_t + c_2 * H_t^2 + c_{3i} * H_t^3 + c_4 * H_t^4 \quad \text{Equação (10)}$$

Em que os valores de  $c$  são coeficientes de um polinômio que em função da cota do reservatório  $H_{i,t}$  permite o cálculo da área alagada ( $hm^2$ ), utilizado para estabelecer a evaporação.

A demanda utilizada na função objetivo foi considerada como uma fração da demanda total requisitada ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

A partir do modelo apresentado é possível analisar para diferentes cenários qual o valor da geração de energia na hidroelétrica para diferentes prioridades no abastecimento, seguindo a seguinte proposta de cenários.

**Tabela 1: Cenários utilizados nos ensaios.**

| Cenário | Atendimento a Demanda d'água | Armazenamento Inicial |
|---------|------------------------------|-----------------------|
| 1       | 100%                         | 80%                   |
| 2       | 200%                         | 80%                   |
| 3       | 50%                          | 80%                   |
| 4       | 100%                         | 30%                   |
| 5       | 200%                         | 30%                   |
| 6       | 50%                          | 30%                   |

Para todos os casos é considerado um horizonte de planejamento de 24 meses. A demanda de energia elétrica e a demanda de consumo de água foi discretizada mensalmente e ambas foram estimadas em função de uma mesma população atendida. Para o estudo realizado foram considerados os dados da Usina de Barra Bonita com os dados fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

As séries de afluentes consideradas foram produzidas estatisticamente considerando a distribuição temporal dos dados históricos, foi considerada uma série de percentis 10% (Cenário com tendência seca).

O Uso Consuntivo (UC) considerado foi para abastecer uma população de 500.000 hab. Sendo para um cenário médio (UC 100%) o valor da vazão é de 0.868  $m^3/s$ , considerando um consumo de 150 L/dia.hab.

A quantidade de vazão destinada ao Uso Consuntivo nos demais cenários foi obtido em função do fator apresentado na Tabela 1

$$UC_{t,considerado} = \text{Fator de Demanda} * UC_{t,considerado} \quad \text{Equação (11)}$$

O Processamento e modelagem foram realizados no GAMS (GAMS, 2016) software de suporte a otimização.

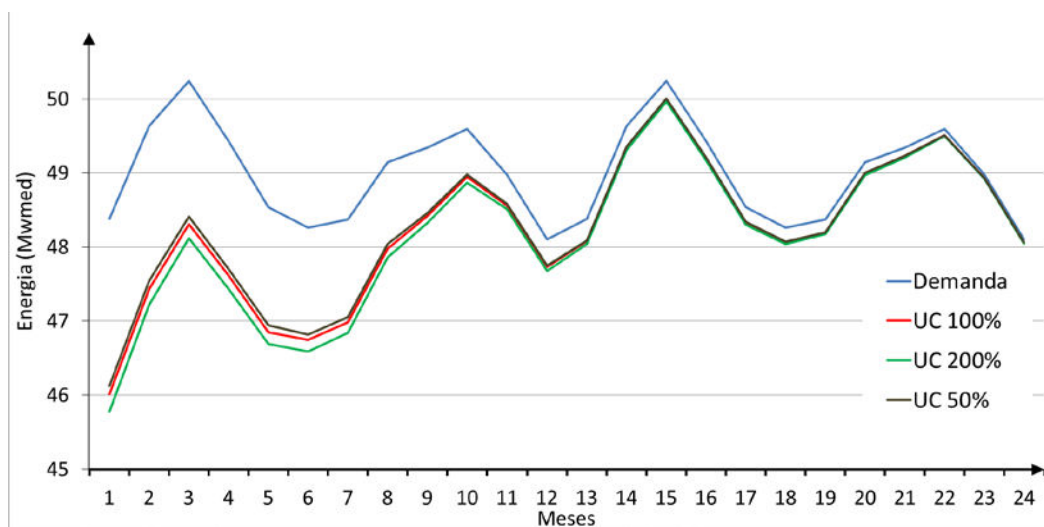
## RESULTADOS

Ao configurar o modelo desenvolvido com as configurações apresentadas anteriormente e processados os cenários estipulados foi possível obter a série de geração de energia elétrica em cada um dos 24 meses de horizonte. Apresentam-se na Tabela 2 os resultados para os Cenários 1, 2 e 3.

**Tabela 2: Resultados para o processamento dos Cenários 1, 2 e 3.**

| <b>Demanda<br/>(MWmed)</b> | <b>Geração<br/>(MWmed)<br/>UC 100%</b> | <b>Geração<br/>(MWmed)<br/>UC 200%</b> | <b>Geração<br/>(MWmed)<br/>UC 50%</b> | <b>Variação UC 200%</b> | <b>Variação UC 50%</b> |
|----------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 48.38                      | 46.01                                  | 45.78                                  | 46.12                                 | -0.50%                  | 0.24%                  |
| 49.63                      | 47.43                                  | 47.22                                  | 47.54                                 | -0.44%                  | 0.23%                  |
| 50.24                      | 48.31                                  | 48.12                                  | 48.41                                 | -0.39%                  | 0.21%                  |
| 49.43                      | 47.61                                  | 47.43                                  | 47.70                                 | -0.38%                  | 0.19%                  |
| 48.54                      | 46.85                                  | 46.69                                  | 46.94                                 | -0.34%                  | 0.19%                  |
| 48.26                      | 46.75                                  | 46.59                                  | 46.82                                 | -0.34%                  | 0.15%                  |
| 48.37                      | 46.98                                  | 46.84                                  | 47.05                                 | -0.30%                  | 0.15%                  |
| 49.14                      | 47.98                                  | 47.86                                  | 48.04                                 | -0.25%                  | 0.13%                  |
| 49.34                      | 48.42                                  | 48.32                                  | 48.46                                 | -0.21%                  | 0.08%                  |
| 49.59                      | 48.95                                  | 48.87                                  | 48.98                                 | -0.16%                  | 0.06%                  |
| 48.98                      | 48.56                                  | 48.51                                  | 48.58                                 | -0.10%                  | 0.04%                  |
| 48.10                      | 47.73                                  | 47.68                                  | 47.75                                 | -0.10%                  | 0.04%                  |
| 48.38                      | 48.08                                  | 48.04                                  | 48.09                                 | -0.08%                  | 0.02%                  |
| 49.63                      | 49.35                                  | 49.31                                  | 49.36                                 | -0.08%                  | 0.02%                  |
| 50.24                      | 49.99                                  | 49.96                                  | 50.00                                 | -0.06%                  | 0.02%                  |
| 49.43                      | 49.20                                  | 49.17                                  | 49.21                                 | -0.06%                  | 0.02%                  |
| 48.54                      | 48.32                                  | 48.30                                  | 48.34                                 | -0.04%                  | 0.04%                  |
| 48.26                      | 48.06                                  | 48.04                                  | 48.07                                 | -0.04%                  | 0.02%                  |
| 48.37                      | 48.19                                  | 48.17                                  | 48.20                                 | -0.04%                  | 0.02%                  |
| 49.14                      | 48.99                                  | 48.97                                  | 49.00                                 | -0.04%                  | 0.02%                  |
| 49.34                      | 49.23                                  | 49.21                                  | 49.23                                 | -0.04%                  | 0.00%                  |
| 49.59                      | 49.51                                  | 49.50                                  | 49.51                                 | -0.02%                  | 0.00%                  |
| 48.98                      | 48.93                                  | 48.92                                  | 48.93                                 | -0.02%                  | 0.00%                  |
| 48.10                      | 48.05                                  | 48.05                                  | 48.06                                 | 0.00%                   | 0.02%                  |

Utilizando os dados obtidos pode-se avaliar a geração pela Figura 2.



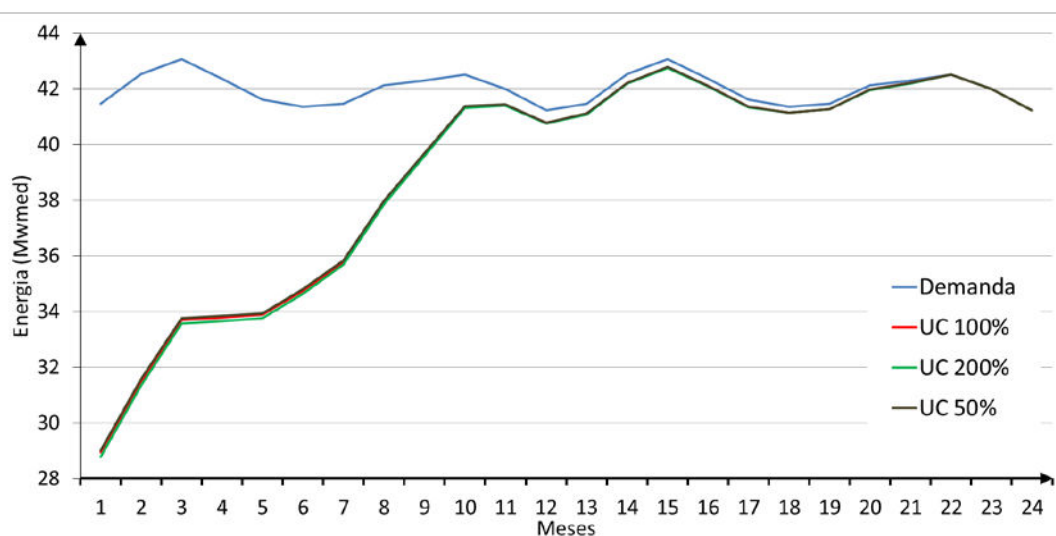
**Figura 2: Geração de Energia Elétrica para os Cenários 1, 2 e 3.**

Nota-se na figura que existe uma variação na geração em função do cenário escolhido, no caso do fator 200% existe uma redução na produção de 0,5 % que representa o valor de 230 kWhmed

**Tabela 3: Resultados para o processamento dos Cenários 4, 5 e 6.**

| <b>Demanda (MWmed)</b> | <b>Geração (MWmed) UC 100%</b> | <b>Geração (MWmed) UC 200%</b> | <b>Geração (MWmed) UC 50%</b> | <b>Variação UC 200%</b> | <b>Variação UC 50%</b> |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 41.47                  | 28.94                          | 28.77                          | 29.02                         | -0.59%                  | 0.28%                  |
| 42.54                  | 31.50                          | 31.35                          | 31.58                         | -0.48%                  | 0.25%                  |
| 43.06                  | 33.70                          | 33.56                          | 33.77                         | -0.42%                  | 0.21%                  |
| 42.37                  | 33.78                          | 33.65                          | 33.85                         | -0.38%                  | 0.21%                  |
| 41.61                  | 33.88                          | 33.76                          | 33.94                         | -0.35%                  | 0.18%                  |
| 41.36                  | 34.74                          | 34.63                          | 34.80                         | -0.32%                  | 0.17%                  |
| 41.46                  | 35.78                          | 35.68                          | 35.83                         | -0.28%                  | 0.14%                  |
| 42.12                  | 37.93                          | 37.84                          | 37.97                         | -0.24%                  | 0.11%                  |
| 42.30                  | 39.66                          | 39.59                          | 39.69                         | -0.18%                  | 0.08%                  |
| 42.51                  | 41.35                          | 41.31                          | 41.37                         | -0.10%                  | 0.05%                  |
| 41.99                  | 41.41                          | 41.39                          | 41.43                         | -0.05%                  | 0.05%                  |
| 41.23                  | 40.77                          | 40.75                          | 40.78                         | -0.05%                  | 0.02%                  |
| 41.47                  | 41.10                          | 41.08                          | 41.11                         | -0.05%                  | 0.02%                  |
| 42.54                  | 42.20                          | 42.19                          | 42.21                         | -0.02%                  | 0.02%                  |
| 43.06                  | 42.77                          | 42.75                          | 42.78                         | -0.05%                  | 0.02%                  |
| 42.37                  | 42.10                          | 42.08                          | 42.10                         | -0.05%                  | 0.00%                  |
| 41.61                  | 41.36                          | 41.34                          | 41.36                         | -0.05%                  | 0.00%                  |
| 41.36                  | 41.14                          | 41.13                          | 41.15                         | -0.02%                  | 0.02%                  |
| 41.46                  | 41.27                          | 41.26                          | 41.27                         | -0.02%                  | 0.00%                  |
| 42.12                  | 41.97                          | 41.96                          | 41.97                         | -0.02%                  | 0.00%                  |
| 42.30                  | 42.20                          | 42.19                          | 42.20                         | -0.02%                  | 0.00%                  |
| 42.51                  | 42.51                          | 42.51                          | 42.51                         | 0.00%                   | 0.00%                  |
| 41.99                  | 41.99                          | 41.99                          | 41.99                         | 0.00%                   | 0.00%                  |
| 41.23                  | 41.23                          | 41.23                          | 41.23                         | 0.00%                   | 0.00%                  |

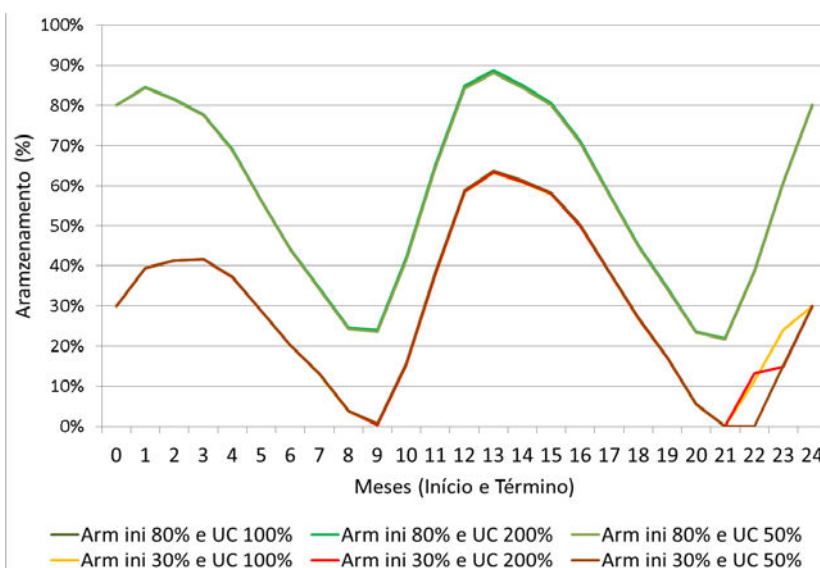
Utilizando os dados obtidos pode-se avaliar a geração pela Figura 3.



**Figura 3: Geração de Energia Elétrica para os Cenários 4, 5 e 6.**

Para todos os cenários processados foi possível também acompanhar o armazenamento no reservatório para cada intervalo mensal, considera-se 25 intervalos, pois o primeiro dia do primeiro mês e o último dia do último mês foram contemplados. Apresenta-se na Figura 4 o comportamento do armazenamento nos quatro cenários processados.

Devido a situações de armazenamento e afluências abaixo da média, é notável em todos os processamentos que a demanda de energia só é plenamente atendida no final do horizonte de planejamento.



**Figura 4: Armazenamento na usina em todos os Cenários.**

## Análise dos Resultados

Diante dos dados apresentados, nota-se que para as situações que envolvem alterações na vazão retirada para o abastecimento, variações na produção de energia elétrica são pouco perceptíveis, em cenários de armazenamento inicial de 80% apenas os primeiros meses o impacto é de -0,50% para um aumento da demanda de 100% e de +0,24% para uma redução na demanda de 50%. No cenário mais seco (armazenamento inicial de 30%) o impacto foi de -0,58% e +0,28%. Nota-se que em todos os cenários o efeito produzido pela operação do reservatório tende a diminuir o impacto, que foi nulo em todos os cenários, nos últimos seis meses do horizonte.

Considerando que variações significativas foram impostas ao UC, os impactos verificados são diminuídos pela operação otimizada do reservatório, na figura 4 é possível verificar que para diferentes cenários é possível que a operação do reservatório seja ajustada para atender as demandas.

## **CONCLUSÕES**

O Abastecimento de água é sempre prioritário sobre os demais usos, foi possível avaliar para seis cenários distintos o impacto gerado por diferentes políticas de consumo (média, aumento de 100% e redução de 50%) o impacto ocasionado em uma usina hidroelétrica, em que o mesmo reservatório é utilizado para os dois fins. Foi considerado que a vazão retirada para consumo não retorna para o reservatório, pode-se compreender com um deságue do esgoto a jusante do reservatório. Para todos os cenários avaliados o impacto máximo ocasionado pelo aumento do consumo de água em 100% chegou a 0,58% em uma situação crítica, porém esse impacto ocorre apenas nos primeiros meses e tende a diminuir gradativamente com a política ótima de operação do reservatório.

Para se estabelecer os resultados foi desenvolvido um modelo de otimização que contempla todas as equações apresentadas na metodologia em formato GAMS, utilizando um modelo não linear com o Solver CONOPT3 (DRUD, 1985).

Para aumentar a avaliação realizada é interessante em estudos futuros avaliar novos cenários e com possibilidades de cenários com diferentes horizontes de planejamento adicionalmente é possível avaliar os efeitos sistemas de usina (série ou paralelo).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. DRUD, A. S. CONOPT: A GRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems. *Mathematical Programming*, 31(2): 153–191, 1985
2. DEANTONI, V. B. Otimização com múltiplos cenários aplicada ao planejamento da operação do sistema interligado nacional. Campinas, 2013. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, 2013.
3. ZAMBON, R. C. et al. Optimization of Large-Scale Hydropower System Operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 3, p. 178–188, 2003.
4. GAMS. 2016. “General algebraic modelling system.” <http://www.gams.com> May 17, 2016.