

Rebaixamento Dinâmico em Reservatórios de Usina Hidrelétrica: Estudo de Caso Aplicado à Bacia do Rio Iguaçu

Carla Ramos Rodrigues Mori
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Asa Norte, Brasília – DF, Brasil
crcarlota@gmail.com

Francisco Damasceno Freitas
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Asa Norte, Brasília – DF, Brasil
ffreitas@ene.unb.br

Abstract— This paper presents a case study related to the dynamic regularization of hydropower reservoirs. The main purpose is to anticipate the drawdown of a reservoir and obtain an empty space in the reservoir in order to allocate a high water volume. The software HydroExpert is used to perform all simulations required for the study. The problem is modeled according to the characteristics of a practical system and simulated for some operational conditions. The experiments on the study are assessed for two Iguaçu river basin hydropowers. The study results indicate the efficacy of the methodology to improve actions for critical hydrological periods which is feasible of occurring under operational conditions.

Index Terms — HydroExpert, dynamic regularization, hydropower reservoir, Sistema Interligado Nacional, Iguaçu river basin.

I. INTRODUÇÃO

Diante do cenário energético brasileiro atual [1] tem sido observada crescente preocupação com relação ao uso da água que é utilizada em usinas hidrelétricas. Fatores climáticos, como o fenômeno El Niño, têm provocado rigorosa seca em alguns estados do Brasil e, ao mesmo tempo, enchentes em outros. Como consequência, surgem desequilíbrios hidrológicos que afetam diretamente as usinas hidrelétricas. Um grande desafio é estocar água para geração de energia elétrica no presente, sem correr o risco de vertê-la inadvertidamente em períodos de chuva.

A deficiência de chuva, conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [2], leva a restrições operativas de usinas, em razão do baixo volume dos reservatórios. Este fato causa impactos energéticos negativos à operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Por consequência, causa aumento do custo marginal de operação (CMO) do sistema, assim como aumento no despacho de usinas termelétricas. Em alguns casos, pode chegar a comprometer a segurança elétrica do sistema.

A importância principal das usinas hidrelétricas consiste em gerar energia elétrica a partir do aproveitamento da energia

proporcionada de alguma forma através do fluxo de água pela usina. Qualquer que seja o tamanho do reservatório, uma usina que tem esta característica possui capacidade reguladora. Neste caso, o alvo é a manutenção da vazão dos cursos de água ou o atendimento de variações de demanda dos usuários. Regularizar a vazão de um rio significa armazenar o excesso de água nos períodos chuvosos visando compensar possíveis deficiências nos períodos de estiagem [3].

Algumas situações práticas que ocorrem são relativas à necessidade de se efetuar ajustes em relação a vazões previamente programadas, visando manter a regularidade do aproveitamento hidrelétrico. Neste tipo de situação pode ocorrer considerável aumento de vazão afluente em comparação à previsão de vazões defluentes. Situações como estas requerem ação imediata objetivando otimizar o uso da água. O procedimento imediato a ser implementado de acordo com o especialista, em situação como esta, é efetuar o enchimento do volume vazio disponível no aproveitamento hidrelétrico a partir de vertimentos não programados.

Algumas metodologias são propostas para definição dos volumes de espera de reservatórios [4]. Mas, três são destacadas: i) desconsideração dos volumes de espera alocados na recessão das trajetórias críticas (período de enchimentos); ii) consideração da previsão de vazão no cálculo das trajetórias críticas; e iii) alteração dos volumes de espera no final da estação chuvosa de acordo com a vazão média mensal observada no início da estação.

Este artigo apresenta um estudo de caso em que se avalia a regularização dinâmica em rios de uma importante bacia do cenário hidrográfico brasileiro. O estudo é também conhecido como rebaixamento dinâmico em reservatório. A metodologia utilizada baseia-se na ação de antecipação do aumento da vazão defluente ou de vertimentos. Este processo pode ocorrer na situação de eminente ocupação do volume vazio do reservatório do aproveitamento motivado pelo aumento de vazões afluentes. A técnica utilizada tem como base o cálculo antecipado e automático para se efetuar o rebaixamento de um reservatório. A implementação do estudo é realizada através do

aplicativo HydroExpert [5], sendo a aplicação específica à bacia do rio Iguaçu. A principal contribuição deste trabalho está em apontar ações que podem ser implementadas a um sistema real e de relevância para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Neste sentido, são realizadas simulações em que a viabilidade prática de alguns cenários é o alvo da avaliação.

Além desta seção introdutória, o artigo está estruturado com mais quatro seções. A Seção II apresenta fundamentos teóricos sobre o tema do trabalho. Na Seção III são abordadas informações simplificadas sobre o sistema estudado, enquanto na Seção IV são apresentados os testes e resultados do estudo. Por fim, a Seção V é dedicada às conclusões do trabalho.

II. FUNDAMENTOS SOBRE REBAIXAMENTO DE RESERVATÓRIO

Nesta seção, descrevem-se a metodologia e os fundamentos básicos sobre rebaixamento de reservatórios de usinas hidrelétricas. Ao fim da seção, comenta-se sobre a utilização do software HydroExpert [5], usado na aplicação prática deste trabalho.

A. Conceitos Preliminares

Para melhor compreensão dos termos técnicos utilizados no tema tratado neste artigo, deve-se considerar a distinção entre os termos vazão natural e vazão afluente. No setor elétrico, tem sido adotado o termo *vazão natural* para identificação da vazão que ocorre em uma seção do rio, caso não houvesse as ações antrópicas na bacia contribuinte. Já o termo *vazão afluente* é utilizado para caracterizar a vazão que chega a um aproveitamento hidroelétrico ou estrutura hidráulica, que é influenciada por obras de regularização e demais ações antrópicas porventura existentes na bacia hidrográfica [1].

A vazão afluente a um aproveitamento é, normalmente, calculada pelo balanço hídrico do reservatório, que corresponde ao balanço das entradas e saídas de água no interior deste, consideradas as variações efetivas de acumulação.

A vazão natural em uma seção de um rio cuja bacia contribuinte está sujeita ao efeito das ações antrópicas é obtida por meio de um processo de reconstituição. Este processo considera as vazões afluentes e defluentes observadas nos reservatórios, tempos de viagem da água em condições naturais e estimativas de evaporação e de uso consuntivo da água na bacia, como abastecimento humano, industrial e irrigação [1].

Um problema que se verifica nas bacias hidrográficas brasileiras é com relação ao controle de cheias. Nestes locais, durante o período hidrológico úmido, em caso de elevada precipitação de chuva, em determinadas situações, torna-se necessário realizar um rebaixamento de reservatórios existentes na bacia afetada. Esta ação visa amenizar os efeitos de uma possível cheia, bem como a recuperação da capacidade de armazenamento dos reservatórios na situação de estiagem.

B. Rebaixamento Dinâmico de Reservatórios

A técnica de rebaixamento dinâmico de reservatórios é

baseada no cálculo de um volume de água excedente. O mesmo é o resultado da diferença entre a previsão de vazões afluentes e a programação de vazões turbinadas [6]. O volume excedente é, então, convertido em um modelo que consiste em determinados quantificadores denominados trajetória de vazão defluente [7]. Detalha-se a seguir a situação para o caso de dois reservatórios.

Seja um reservatório qualquer i . O problema consiste em se determinar a vazão defluente deste reservatório para um determinado cenário. Essencialmente, este problema é formulado considerando-se a diferença entre o aumento da vazão afluente, em comparação à previsão de vazões defluentes já programadas. Assume-se que o cenário seja caracterizado por situação de iminente ocupação do volume vazio do reservatório, motivado pelo aumento de vazões afluentes.

Para que o reservatório à jusante identificado com o índice j não seja imediatamente atingido pelas vazões à montante, são inseridas restrições de vazões. Assim, é evitada enchente, pois a vazão defluente em i terá uma trajetória inferior à máxima vazão natural ao reservatório de índice j . O esquema na Fig. 1 ilustra a situação em que os reservatórios i e j são considerados [8].

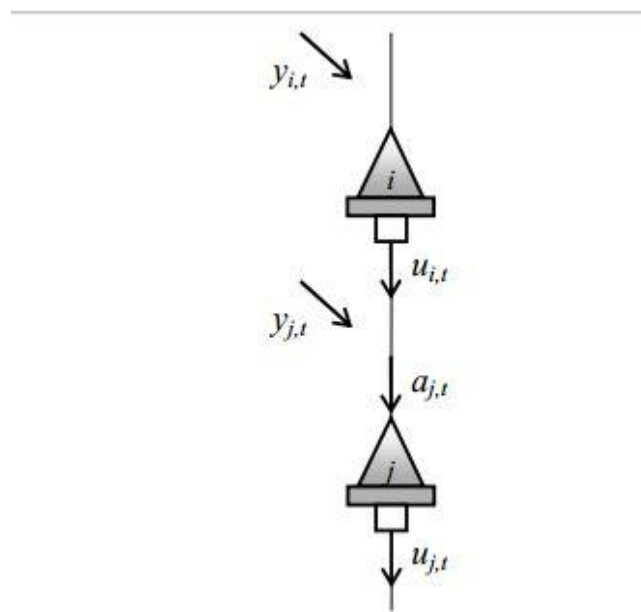


Fig. 1. Arranjo esquemático de dois reservatórios i e j conectados em cascata [8]

No esquema da Fig. 1, $y_{i,t}$ e $y_{j,t}$ são vazões incrementais em $[m^3/s]$, associadas aos reservatórios i e j , no intervalo t ; $u_{i,t}$ e $u_{j,t}$ são vazões defluentes, medidas em $[m^3/s]$, associadas aos reservatórios i e j , no intervalo t ; $a_{i,t}$ e $a_{j,t}$ são vazões afluentes dos aproveitamentos i e j , respectivamente, no intervalo t , considerando tempo de viagem, ambas medidas em $[m^3/s]$.

Para o cálculo do volume excedente, deve-se determinar a vazão afluente ao reservatório. Esta grandeza é composta pela

soma das vazões defluentes imediatamente à montante do reservatório de interesse i . Nesta avaliação, leva-se em conta o tempo de viagem entre os aproveitamentos, bem como a estimativa da vazão incremental. O cálculo é determinado para um intervalo t da seguinte forma [5],[8]:

$$\hat{a}_{i,t} = \sum_{m \in \Omega_i} \hat{u}_{m,t-tv_m} + \hat{y}_{i,t} \quad (1)$$

em que $\hat{a}_{i,t}$ é a estimativa de $a_{i,t}$; $\hat{y}_{i,t}$ é a estimativa de $y_{i,t}$; Ω_i é um conjunto de índices dos aproveitamentos diretamente à montante de i ; $\hat{u}_{m,t}$ é a estimativa de $u_{m,t}$; tv_m é o tempo médio de viagem da vazão defluente entre os reservatórios m e i , em horas.

Considerando o cálculo através das vazões afluentes previstas e da programação de vazões turbinadas, o cálculo do volume excedente é realizado a partir das trajetórias de vazões afluentes previstas por [5]:

$$\chi_i^{ex} = \sum_{t=t_{i,ex}}^{t_{i,ex}+T^{ex}} (\hat{a}_{i,t} - \hat{q}_{i,t} - \hat{d}_{i,t}) f_{cn} \quad (2)$$

onde $\hat{q}_{i,t}$ é uma estimativa da vazão turbinada no reservatório i , durante o intervalo t [m³/s]; $\hat{d}_{i,t}$ é uma estimativa da vazão de desvio, caso existam estruturas, associada ao reservatório i , durante o intervalo t [m³/s]; $t_{i,ex}$ é um índice relativo ao intervalo inicial de tempo no horizonte do estudo associado ao cenário de vazões para o qual se quer determinar o volume em excesso; T^{ex} é o número de intervalos de tempo do cenário de vazões para o qual se quer determinar o volume em excesso; f_{cn} é o fator utilizado para a conversão da unidade de vazão [m³/s] para a unidade de volume [hm³].

O cálculo do volume vazio no reservatório está associado a uma cota X_i^v . Este nível é determinado como a diferença entre o nível máximo operativo, $X_i^{\max}$, e o nível relativo ao volume inicial do reservatório no primeiro intervalo do horizonte de cálculo do rebaixamento $t_{i,ex}$ conforme a seguir:

$$X_i^v = X_i^{\max} - X_{i,t_{i,ex}} \quad (3)$$

O algoritmo de rebaixamento dinâmico determina de forma antecipada uma trajetória de vertimentos extras, caso ocorra excedente de volume de água maior que o volume vazio no reservatório, considerando todas as restrições de cada aproveitamento.

C. Vazão Defluente para Rebaixamento e Recuperação

O volume de água excedente pode assumir um valor positivo ou negativo. Na situação em que esse valor é positivo, determina-se o vertimento antecipado para rebaixamento e recuperação, $\hat{S}_{i,t}$, por meio de (4). Por outro lado, se o valor

for negativo (há a necessidade de recuperação do reservatório), não é calculado um vertimento extra. Neste caso, a diferença que ocorre entre as trajetórias de afluência e vazões turbinadas fica armazenada no próprio reservatório.

$$\hat{S}_{i,t} = \frac{X_i^{ex} - X_i^v}{T^{rr} \Delta t}, \quad t = t_i^{rr}, \dots, t_i^{rr} + T^{rr} \quad (4)$$

Em (4), t_i^{rr} é o índice do intervalo inicial de tempo do horizonte do estudo relativo ao cenário de rebaixamento e recuperação dinâmicos; T^{rr} , o número de intervalos de tempo para aplicação do rebaixamento e recuperação dinâmicos; e Δt , a duração do intervalo de discretização do horizonte de estudo, em segundos. Os parâmetros t_i^{rr} e T^{rr} não são necessariamente iguais aos utilizados para se determinar o intervalo de cálculo do volume de água em excesso. Em vista disso, é possível se obter um intervalo de rebaixamento e recuperação com duração inferior. Este procedimento dá lugar a um efeito de antecipação de vertimento frente à previsão de excesso no balanço de afluência e vazão turbinada, se comparado ao volume vazio do reservatório.

Considerando o volume excedente, na situação em que este é superior ao volume vazio no reservatório, determina-se uma nova previsão para a programação de defluências do reservatório i , da seguinte forma:

$$\hat{u}_{i,t} = \hat{q}_{i,t} + \hat{S}_{i,t}, \quad t = t_i^{rr}, \dots, t_i^{rr} + T^{rr} \quad (5)$$

Na situação em que o volume excedente é inferior ao volume vazio no reservatório, deve-se igualar a trajetória de vazão defluente à trajetória de vazão turbinada estimada por simulação. Ou seja,

$$\hat{u}_{i,t} = \hat{q}_{i,t}, \quad t = t_i^{rr}, \dots, t_i^{rr} + T^{rr} \quad (6)$$

A programação de vazões defluentes do reservatório i deve atender à máxima vazão natural afluente no reservatório imediatamente à jusante. Um exemplo disso é o que ocorre na restrição operativa envolvendo os reservatórios das usinas hidrelétricas Foz do Areia e Segredo [2],[5] (ver esquema de aproveitamentos na Fig. 2 para localização dessas usinas).

D. Software HidroExpert

A metodologia descrita anteriormente é base do software especializado HidroExpert [5],[8]. Trata-se de simulador hidráulico, conectado a uma base de dados técnicos de aproveitamentos hidroelétricos. O software é composto por aplicativos, um banco de dados próprio e permite conexões com banco de dados de outras empresas [9],[10].

O software foi utilizado neste artigo, no qual faz-se uso de um banco de dados denominado HidroData, que por sua vez recebe os dados temporais dos aproveitamentos da BDT – Base de Dados Técnica do ONS. São permitidas simulações para todas as usinas em operação no SIN com discretizações mensal, semanal, diária, horária e de meia-hora [5],[8],[11],[12].

Na seção que se segue, utiliza-se a metodologia descrita acima e faz-se uso do HidroExpert para aplicações em usinas da bacia do rio Iguaçu.

III. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO IGUAÇU

A bacia do rio Iguaçu localiza-se na região Sul do Brasil em grande parte no estado do Paraná. Esta bacia tem também áreas de contribuição no estado de Santa Catarina e na República Argentina. O rio Iguaçu, afluente do rio Paraná pela margem esquerda, drena uma área de 68.000 km², tendo percurso de aproximadamente 1.100 km. As nascentes deste rio são localizadas na vertente leste da Serra do Mar [1][2].

A cada ano é sinalizado qual período hidrológico deverá ser caracterizado para cada região. No ano de 2014, foi previsto que o cenário seria de período normal. Com isso não, houve preocupação com relação à bacia do Iguaçu em realizar uma operação especial, caso ocorresse uma grande vazão com elevada quantidade de chuva ou com estiagem.

Porém, no meio do ano de 2014, a bacia do Iguaçu foi surpreendida com uma grande quantidade de chuva, que pelo histórico foi considerada a maior cheia. Após essa ocorrência, a bacia ficou exposta a qualquer cenário possível.

Diante disso, este artigo objetiva estudar os efeitos do rebaixamento dinâmico nos reservatórios dessa bacia, de forma coordenada, para que seja possível alocar um volume de espera, considerando todas as restrições dos aproveitamentos diante de diversas ocorrências de cheias [13].

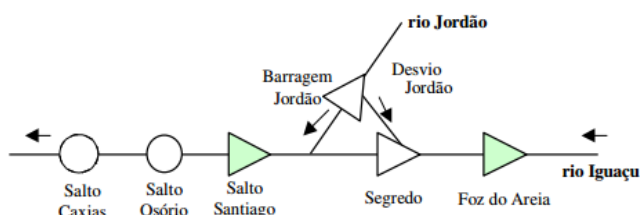


Fig. 2 – esquema ilustrativo indicando a localização dos principais aproveitamentos hidroelétricos existentes na bacia do rio Iguaçu.

IV. ESTUDOS E RESULTADOS

Nesta seção descrevem-se os resultados da aplicação do algoritmo de rebaixamento dinâmico na bacia hidrográfica do rio Iguaçu. O objetivo é determinar de forma escalonada trajetórias de vertimento extras nos reservatórios dessa bacia, caso ocorra um excesso de volume de água, não dependendo exclusivamente da previsão do cenário hidrológico.

Como dados, para realização de simulações, foram utilizados os relativos à semana operativa de 13/07/2015 a 17/07/2015. Para esta semana, foi assumida ocorrência de altas precipitações em toda a bacia do Iguaçu.

A Fig. 3 ilustra graficamente a situação dos armazenamento em reservatórios da bacia do rio Iguaçu no início da simulação. O reservatório de Foz do Areia, em termos de valor útil (VU) de armazenamento, estava com

87,79% VU; Salto Segredo, com 99,59% VU; Salto Santiago, com 64,61% VU; Salto Osório, com 93,37% VU; e Salto Caxias, com 86,39% VU.

Com esses volumes, todos os reservatórios estavam vertendo água, com exceção da UHE Foz do Areia e UHE Salto Santiago. O reservatório de Foz do Areia fica na cabeceira da bacia e o reservatório de Salto Santiago fica no meio da cascata. Desta forma, foi utilizado o algoritmo de rebaixamento para sinalizar o quanto o reservatório de Foz do Areia poderia acumular água. Assim, foi possível se avaliar o comprometimento das estruturas do reservatório à jusante e determinar o aumento da abertura dos reservatórios, uma vez que tanto a UHE Foz do Areia, quanto a UHE Salto Segredo, estavam com o volume útil acima de 80%.

Com a finalidade de avaliar o impacto de aumento da afluência na bacia, foi simulada uma elevação de precipitação à montante da UHE Foz do Areia. Nesta simulação, assumiu-se que o volume útil da usina poderia atingir 92% da sua capacidade em um intervalo de 8 horas.

Testes foram realizados no simulador hidráulico e ficou evidenciada a necessidade de abertura do vertedouro com 92% e consequente aumento do vertimento da UHE Segredo com antecedência de 6 horas. Nestas condições, o reservatório da UHE Salto Santiago, logo à jusante, poderia então acumular de 64% até 80%. Com isto, seria possível receber o volume de água e acumular essa água, defluindo o mínimo possível para o reservatório logo à jusante.

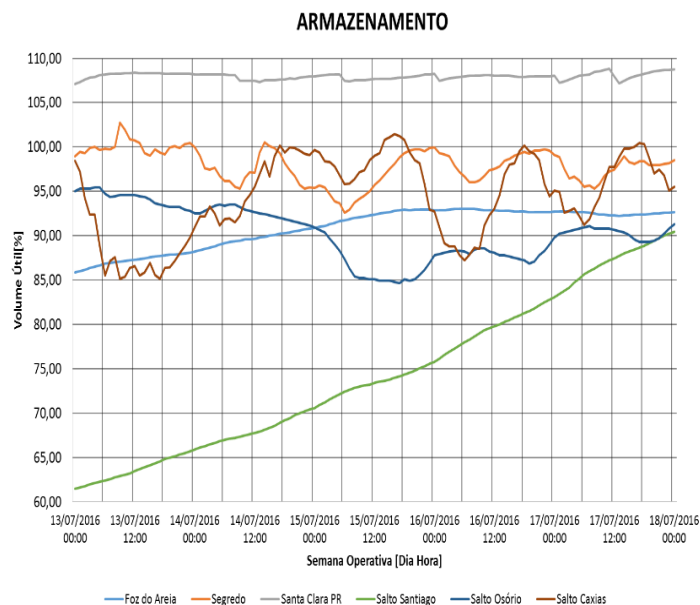


Fig. 3 – Armazenamento em diversos reservatórios ao longo de alguns dias

Diante disso, os reservatórios de Salto Osório e Salto Caxias permaneceriam com vertimentos extras.

O simulador hidráulico sinalizou o rebaixamento no reservatório de Foz do Areia através da abertura do vertedouro, quando o volume útil chegasse a 92% com vazão defluente de 133 m³/s por volta de 11h00, no dia 15/07/2015,

conforme indicado nos gráficos da Fig. 4.

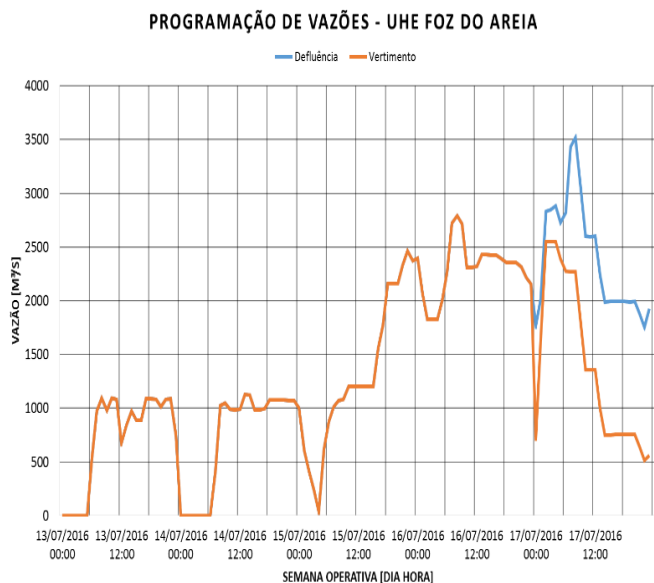


Fig. 4 – Indicações da vazão como decorrência da abertura do vertedouro da UHE Foz do Areia (escala na horizontal corresponde a divisões por meio-dia)

Com a abertura do vertedouro de Foz do Areia, o simulador indicou um vertimento no reservatório de Salto Santiago, por volta de 18h00, no dia 17/07 com 90 % e vazão de 63 m³/s, conforme ilustração das curvas na Fig. 5.

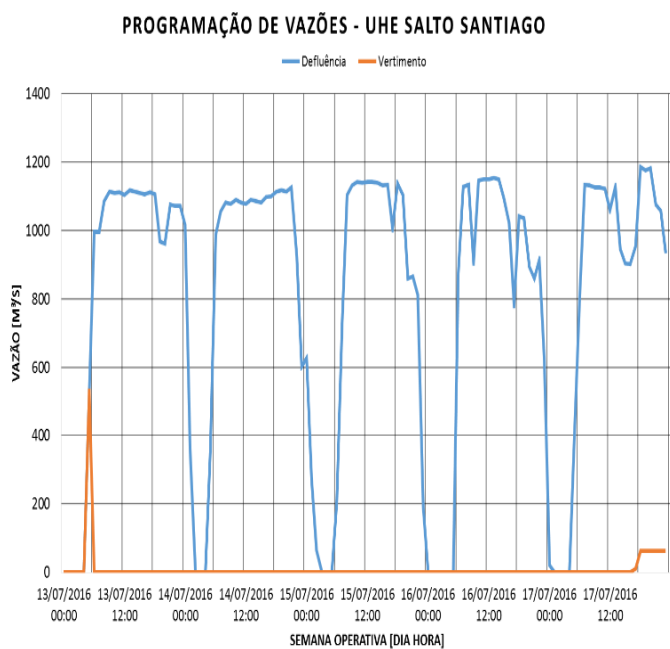


Fig. 5 – Indicações de vazão ao se verificar abertura do vertedouro da UHE Salto Santiago (escala na horizontal corresponde a divisões por meio-dia)

V. CONCLUSÃO

Este artigo abordou o problema relativo ao rebaixamento e recuperação de reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos.

A importância deste tema está no fato do Brasil ser um país cuja matriz de energia elétrica ser, em grande parte, de natureza hidroelétrica. Desta forma, os reservatórios, dependendo das condições climáticas, ficam sujeitos a pequenos e grandes volumes de água. Na condição de cheia, há a necessidade de coordenação do controle de vazões. Em função disso, destaca-se a importância da previsibilidade das vazões. Neste trabalho, foi utilizado o simulador HydroExpert [5] com o objetivo de prever a antecipação de possível rebaixamento de um reservatório. Com isto, se obtém um volume vazio no reservatório rebaixado, e assim, torna-se possível armazenar um grande volume de água nesse reservatório, sem causar danos a outros aproveitamentos

A metodologia foi aplicada a aproveitamentos da bacia do rio Iguaçu, destacando-se estudos relativos aos reservatórios das UHE Foz do Areia e Salto Santiago.

As investigações consideradas neste trabalho podem ser estendidas a estudos com outras bacias hidrográficas, uma vez adequadamente modelados os aproveitamentos específicos de interesse.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a HydroByte Software por permitir o uso do software HydroExpert nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] ONS, “Cheia ocorrida na Bacia do Rio Iguaçu em junho de 2014,” Relatório ONS, 2014.
- [2] ONS. “Diretriz para as regras de Operação de Controle de Cheias - Bacia do Rio Iguaçu (Ciclo 2013 - 2014),” 2015.
- [3] I. G. Hidalgo, D. G. Fontane, S. S. Filho, M. A. Cicogna, J. E. G. Lopes, “Procedimentos para Consolidação de Dados de Usinas Hidrelétricas Baseadas nas Informações Registradas,” Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, pp. 9-21, 2012.
- [4] J. M. Damázio, I. P. Raupp, F. S. Costa, “Minimização do Conflito Entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios,” 2010.
- [5] M.A. Cicogna, “HYDROBYTE SOFTWARE - HydroSim XP: Manual do Usuário,” Disponível em: <www.hydrobyte.com.br>. Acesso em 05 de maio de 2015.
- [6] M. A. Cicogna, “Curso HydroExpert – módulo 7 – HydroSim XP – RR Dinâmico, versão 1.0 – 2014-08-17, impressão realizada em 23/03/2015.
- [7] ONS, “Algoritmo FASG – Descrição Técnica do Algoritmo FASG da COPEL implementado no SSD HydroExpert,” Projeto ONS/HYDROBYTE, 2011.
- [8] M. A. Cicogna, “Manual do assistente de rebaixamento e recuperação dinâmicos pertencentes ao modelo de simulação HydroSim XP do Sistema HydroExpert,” versão 1.0 atualizada em 30/01/2015.
- [9] M. A. Cicogna, D. G. Fontane, I. G. Hidalgo, J. E. Lopes, “Multireservoir Simulation Using Multipurpose Constraints and Object-Oriented Software Design,” Proceedings of the ASCE – World Environmental & Water Resources Congress (EWRI), p. 5030-5040, 2009.

- [10] L. G. F. Guilhon, G. L. C. P. Oliveira, M. Alexandrino, "Aplicação do simulador hidráulico Hydroexpert à bacia do rio Iguaçu," XI EDAO, Florianópolis, pp. 1-10, Nov/2010.
- [11] M. A. Cicogna, I. G. Hidalgo, J. G. Lopes, "Simulação Multi-critério da Operação Hidráulica de reservatório," XX SNPTEE – Recife – PE, 2009.
- [12] L. G. F. Guilhon, M. A. Cicogna, "Uso do Simulador Hidráulico Hydroexpert na Programação da Operação de Controle de Cheias," Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves – RS, 2013.
- [13] P. D. Oliveira, "A metodologia de adoção e atualização das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidroelétricos no planejamento eletroenergético: o ONS e a Política Nacional de Recursos Hídricos," VII Encontro para Debates de Assuntos de Operação, Foz do Iguaçu, março de 2002.