

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO HIDROGRAMA ECOLÓGICO PARA O TRECHO DE VAZÃO REDUZIDA DO APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO BELO MONTE

*Felipe B. Jardim*¹; Francisco E. O. Silva²; Veber A. F. Costa³*

Resumo – O estudo para implantação do Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte, na Bacia Hidrográfica do Rio Xingu, passou por diversas alterações sobre a concepção do aproveitamento a ser implantado, desde o início dos estudos de inventário do potencial hidrelétrico da bacia na década de 1970. Por fim, decidiu-se pela eliminação da capacidade de armazenamento hidráulico por meio do reservatório de acumulação inicialmente planejado, optando-se pela implantação de uma operação a fio d'água. O arranjo adotado para o aproveitamento hidrelétrico formou o denominado Trecho de Vazão Reduzida (TVR), que será submetido ao Hidrograma Ecológico de Consenso, definido no Estudo de Impacto Ambiental do empreendimento, e estabelecido na resolução de outorga de direito de uso de recursos hídricos para o projeto. O objetivo deste trabalho é avaliar, por uma simulação estocástica, a exposição do aproveitamento hidrelétrico durante o período de estiagem anual, considerando a exigência de atendimento da vazão mínima a ser liberada para o Trecho de Vazão Reduzida frente à possibilidade de geração de energia pela casa de força principal do aproveitamento no mesmo período.

Palavras-Chave – Simulação Estocástica, Aproveitamento Hidrelétrico.

STATISTICAL EVALUATION OF THE ECOLOGICAL HYDROGRAPH FOR THE REDUCED FLOW STRETCH OF BELO MONTE HYDROELECTRIC PLANT

Abstract – The study for the implementation of the Belo Monte Hydroelectric Plant, in the Xingu River Basin, has undergone several changes about the design of the hydroelectric arrangement to be installed, since the beginning of inventory studies of the hydroelectric potential of the basin in the 1970s. It was decided to eliminate the hydraulic storage capacity by accumulation reservoir initially planned, choosing instead the implementation of a water stream operation. The arrangement adopted for the hydroelectric use has formed the Reduced Flow Stretch, which is submitted to the Ecological Consensus Hydrograph, defined in the Environmental Impact Study of the project, and established in the water resources use rights grant for the project. The purpose of this study is to evaluate, by means of stochastic simulation, the risk of the hydroelectric plant during the annual drought period, regarding the requirements of minimum flow rates to be released to the Reduced Flow Stretch, as opposed to the possibility of the operation of the main power house at the same period.

Keywords – Stochastic Simulation, Hydroelectric Use.

¹ Aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, fbjardim@outlook.com.

² Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, fsilva@ehr.ufmg.br.

³ Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, veber@ehr.ufmg.br.

* Autor correspondente

INTRODUÇÃO

O Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte (AHE Belo Monte), situa-se na bacia hidrográfica do Rio Xingu, que drena uma área total de 509.000 km² e está contida na bacia do Rio Amazonas. Trata-se de um aproveitamento com potência total instalada de 11.233,33 MW, composto por uma casa de força principal (UHE Belo Monte) com 11.000 MW, e uma casa de força complementar (UHE Pimental) de 233,33 MW.

Segundo Baptista et al. (2017), à época na qual a bacia do rio Xingu foi inicialmente inventariada, os estudos tinham como diretriz o aproveitamento hidrelétrico integral do potencial de um rio, de modo que o resultado fosse uma sequência contínua de reservatórios sem trechos intermediários não aproveitados. Priorizava-se a localização dos reservatórios de acumulação nos trechos altos e médios do rio, regularizando assim as vazões naturais ao longo de seu percurso. Entretanto, após um longo período desde o início dos estudos de inventário, no qual houve inúmeras discussões em torno do aproveitamento do potencial hidrelétrico do Rio Xingu, a concepção inicial de divisão de quedas do rio foi reduzida a um único aproveitamento operado a fio d'água.

Sucintamente, o AHE Belo Monte destina-se a aproveitar o desnível existente de aproximadamente 90 metros ao longo dos 100 km de extensão da Volta Grande do Xingu. O arranjo geral do empreendimento consiste em um barramento no leito do rio, formando o reservatório principal, situado na própria calha fluvial do rio. A partir deste reservatório principal, a água é desviada por um canal de 20 km até o denominado reservatório intermediário, de onde será realizada a geração de energia pela casa de força principal (UHE Belo Monte), motorizada por 18 turbinas Francis de 611,11 MW cada. Em função deste desvio, o trecho da Volta Grande do Xingu, a jusante da barragem principal, ficará sujeito a vazões reduzidas, sendo assim denominado Trecho de Vazão Reduzida (TVR). A casa de força complementar, situada na barragem principal (UHE Pimental), tem a finalidade de turbinar parte da vazão a ser liberada para o TVR.



Figura 1 - Arranjo Geral do Aproveitamento AHE Belo Monte (KAMEL et al., 2017).

Na resolução de outorga de direito de uso de recursos hídricos, concedida pela Agência Nacional de Águas em fevereiro de 2011, estabeleceram-se hidrogramas de vazões médias mensais a serem liberados para o TVR, sendo feito a alternância anual entre os hidrogramas A e B, dispostos nesta resolução de outorga. Segundo o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do AHE Belo Monte (2009), o hidrograma ecológico proposto é resultado de um consenso entre a preservação ambiental e a geração de energia para o Trecho de Vazão Reduzida, combinando o propósito do aproveitamento hidrelétrico com o atendimento às necessidades mínimas para se preservar o meio ambiente e os modos de vida da população e das comunidades indígenas na Volta Grande do Xingu. Além disso, para o mês de outubro, a vazão definida no hidrograma deve ser a vazão instantânea, e não a média mensal, excetuando-se os casos em que as vazões afluentes são inferiores à mínima estabelecida no hidrograma. Nessas situações, toda a vazão afluente deve ser liberada para o TVR de forma instantânea.

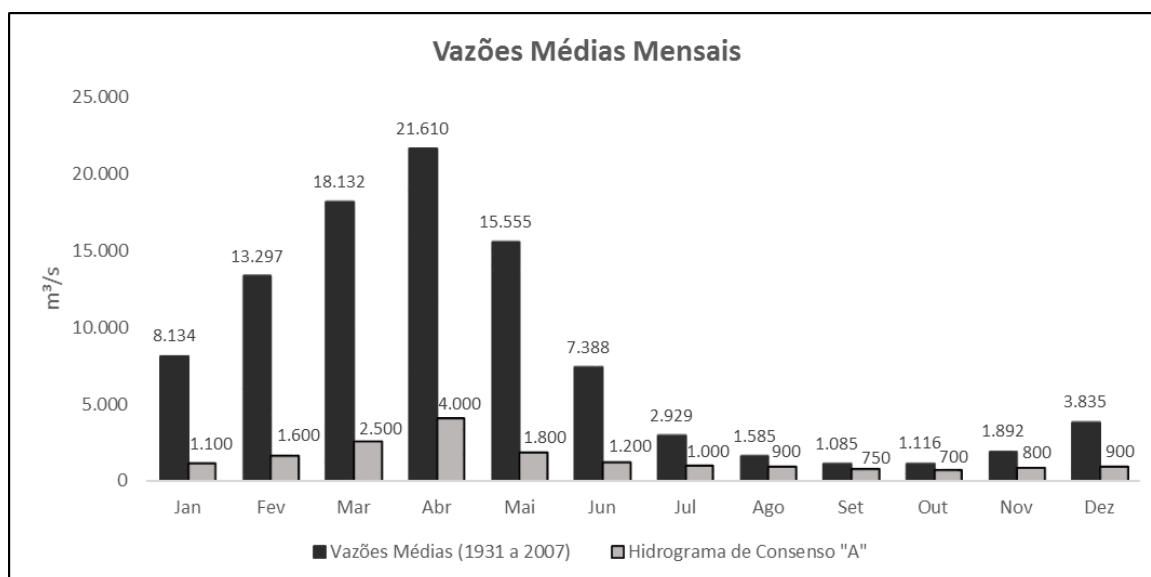


Figura 2 - Hidrograma de Consenso e médias mensais amostrais.

Tabela 1 - Hidrograma de Consenso (ANA 2011).

Vazão a ser mantida no Trecho de Vazão Reduzida, em m³/s												
Hidrograma:	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A	1.100	1.600	2.500	4.000	1.800	1.200	1.000	900	750	700	800	900
B	1.100	1.600	4.000	8.000	4.000	2.000	1.200	900	750	700	800	900

Tendo em vista o arranjo a fio d'água sob o qual o aproveitamento hidrelétrico foi implantado e as restrições referentes às vazões mínimas a serem mantidas no TVR, este trabalho objetiva realizar uma análise a respeito da exposição do aproveitamento hidrelétrico durante o período de estiagem anual, compreendido entre os meses de agosto a dezembro, sob a consideração que, em casos de não atendimento à vazão mínima prevista nos hidrogramas de consenso, o potencial energético referente ao desnível entre as duas casas de forças deixa de ser aproveitado. Para isso, foi utilizada a série amostral de vazões médias mensais obtidas no posto fluviométrico 18901080, situado no AHE Belo Monte, no período de 1931 a 2007, para análise estatística sobre a probabilidade de não atendimento das vazões do Hidrograma de Consenso, o que resultaria na impossibilidade de geração na casa de força principal (UHE Belo Monte). Posteriormente, por meio de simulação estocástica, avaliou-se a possibilidade de ocorrerem meses consecutivos sem geração na UHE Belo Monte, cenário em que as

vazões afluentes médias mensais seriam inferiores aos valores estabelecidos no Hidrograma de Consenso durante meses consecutivos.

METODOLOGIA

A etapa inicial da metodologia consiste na análise preliminar de dados. O comportamento dos elementos da série, agregados segundo os meses do ano, é sumariado por meio de análise gráfica (histogramas de frequência e gráficos box-plot) e do cálculo de estatísticas amostrais, tais como média, variância, dispersão e coeficiente de assimetria. A partir dessa análise, um modelo probabilístico adequado, com aderência aferida por meio dos testes de hipóteses do Qui-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov, é ajustado às séries reduzidas de cada mês e as probabilidades de não atendimento ao hidrograma de consenso são estimadas.

Tabela 2 - Análise preliminar de dados.

Dados Amostrais												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
N:	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
Mín. (m³/s):	1.132	3.960	9.585	9.564	6.605	2.880	1.421	911	425	380	560	1.176
Máx. (m³/s):	17.948	23.290	42.442	41.621	27.575	14.775	4.723	2.484	1.756	2.146	4.047	9.778
\bar{x} (m ³ /s):	8.134	13.297	18.132	21.610	15.555	7.388	2.929	1.585	1.085	1.116	1.892	3.835
\bar{s} (m ³ /s):	3.578	4.296	5.608	6.787	5.140	2.995	719	354	246	353	611	1.295
Assimetria (g):	0,796	0,211	1,281	0,775	0,478	0,871	0,687	0,609	0,061	0,288	0,817	1,477

A modelagem estocástica, utilizada neste trabalho para geração de séries sintéticas de vazões a partir de dados previamente observados, é justificada e motivada pelo fato da impossibilidade de repetição na realização de experimentos causados por fenômenos naturais. As séries sintéticas geradas podem ser usadas para conhecer de forma mais acurada o comportamento da variável hidrológica estudada e das incertezas associadas à estimação paramétrica. As simulações são efetuadas segundo os preceitos de modelagem Box-Jenkins (Box e Jenkins, 1976), na qual observações precedentes de vazões médias mensais e erros de previsão constituem variáveis explicativas em um modelo de regressão linear, e a parcela não explicada da variação da referida série de vazões é atribuída a ruído branco gaussiano. Modelos autorregressivos (AR, do acrônimo em inglês para “*autoregressive*”), de média móvel (MA, ou “*moving average*”), e combinações desses com possibilidade de diferenciação da série (ARIMA, ou “*autoregressive integrated moving average*”) são avaliados por meio do coeficiente de determinação, critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação de Bayes (BIC), e gráficos de diagnóstico de resíduos. Uma vez selecionado o modelo de série temporal, são geradas 10.000 séries sintéticas de vazões médias mensais, e estimadas as frequências de falhas isoladas e em sequências.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse da amostra de vazões médias mensais, foi realizada a análise preliminar de dados. Estatísticas amostrais são apresentadas na Tabela 2. Por se tratar de uma série de médias mensais, de tamanho relativamente grande (77 elementos), pode-se inferir, como uma decorrência do *Teorema do Limite Central*, que a variável estudada converge em distribuição para uma Distribuição Normal. Tal hipótese é corroborada pelos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e do Qui-Quadrado, ao nível de significância de 5%. A Tabela 3 apresenta as probabilidades de não atendimento ao hidrograma de consenso prescrito, em um dado mês do ano, a partir de um modelo Gaussiano.

Tabela 3 - Probabilidades de não atendimento do Hidrograma de Consenso.

Probabilidade de não atendimento dos hidrogramas A e B												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P (x<A):	2,47%	0,32%	0,27%	0,47%	0,37%	1,94%	0,37%	2,63%	8,72%	11,96%	3,69%	1,17%
P (x<B):	2,47%	0,32%	0,59%	2,25%	1,23%	3,60%	0,81%	2,63%	8,72%	11,96%	3,69%	1,17%

Apesar de o hidrograma B apresentar maiores probabilidades de não atendimento em relação ao hidrograma A em alguns meses do ano, durante a estiagem as vazões estabelecidas em ambos são as mesmas, as quais são, portanto, associadas às mesmas probabilidades de falha. Destacam-se os meses de setembro e outubro, cujas probabilidades de não atendimento ao Hidrograma de Consenso são de 8,75% e 11,96%, respectivamente. Esta elevada probabilidade encontrada nos meses de estiagem sugere a necessidade de uma análise mais detalhada, observando que essa análise preliminar, a qual se valeu somente da série observada, considera a independência entre vazões em meses consecutivos. Se por um lado ela permite identificação da probabilidade de falha a cada mês de forma imediata, por outro se apoia em uma premissa que se revelou imprecisa, uma vez que a simulação estocástica indicou a existência de uma componente autorregressiva na série. De fato, a suspeita da existência dessa inter-relação entre vazões em meses consecutivos, plausível em função da escala da bacia estudada, respalda a utilização da metodologia empregada.

Para a modelagem estocástica, primeiramente foi realizada a transformação da série de vazões médias mensais, por meio de anamorfose logarítmica. Em seguida, efetuou-se a análise das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial da série transformada, as quais indicaram a utilização de ao menos duas observações precedentes de vazões para constituição do modelo de regressão. Por fim, realizou-se o ajuste de diferentes modelos ARIMA sendo feita a opção pelo modelo ARMA (2, 3), que, ainda que menos parcimonioso que alternativas com desempenho similar, como ARMA (2, 1) e ARMA (2, 2), descreveu de maneira mais adequada o comportamento especificado *a priori* para os resíduos de modelagem. A Figura 3 apresenta o diagrama de dispersão das vazões observadas e simuladas. É possível perceber que a dispersão dos pontos em torno da reta de 45° é reduzida, indicando a adequação do modelo proposto, o qual mostrou-se apto a explicar 93,5% da variação das vazões médias observadas.

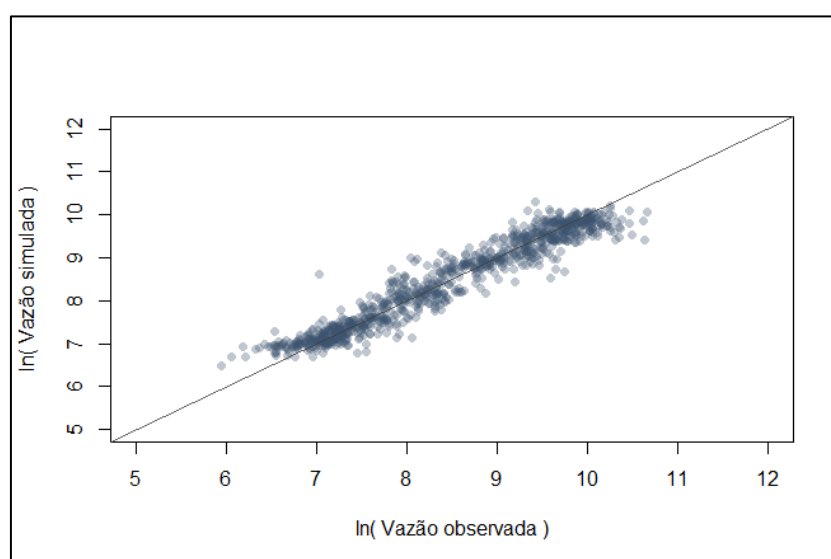


Figura 3 – Análise da série logaritimizada - Modelo ARIMA (2, 0, 3).

Em seguida, avaliou-se a hipótese de independência dos resíduos de modelagem, com auxílio de suas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, apresentadas na Figura 4. Observa-se que

algum grau de autocorrelação persistiu nos resíduos. Contudo, tendo-se em vista os reduzidos valores de correlação serial, infere-se que o possível viés introduzido nas estimativas dos parâmetros do modelo em decorrência da dependência temporal dos erros não seja de grande magnitude.

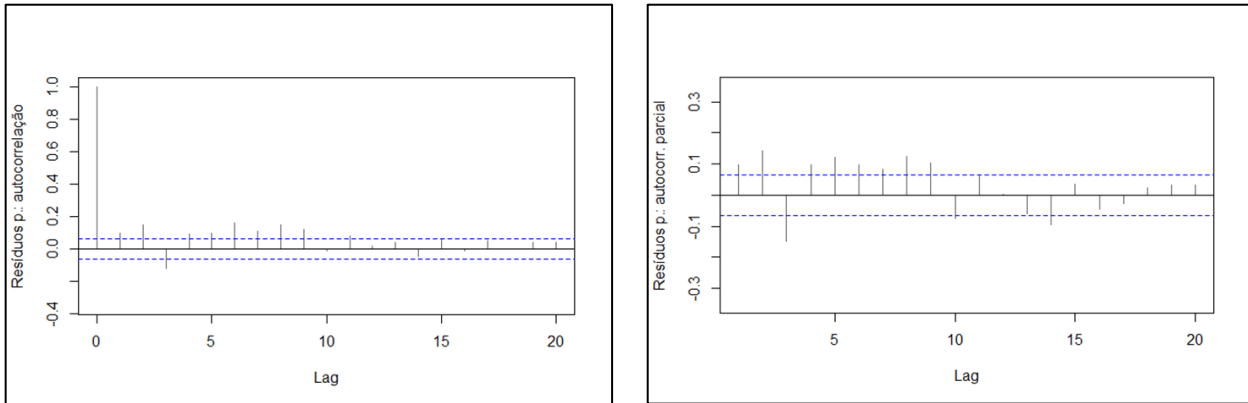


Figura 4 – Funções de autocorrelação dos resíduos (ACF) e autocorrelação parcial dos resíduos (PACF).

Por fim, verificou-se a hipótese de normalidade dos erros da regressão, com auxílio de diagramas quantil-quantil (QQ) e comparação entre as densidades teórica e empírica, apresentadas na Figura 5. Percebe-se sobretudo na parte central do diagrama quantil-quantil, a aderência à distribuição gaussiana. Nas extremidades, contudo, é observado um descolamento, indicando que o comportamento dos resíduos nas caudas da distribuição não é descrito de maneira adequada. A aderência à distribuição gaussiana pode também ser aferida pela proximidade entre as densidades teórica e aquela advinda dos dados.

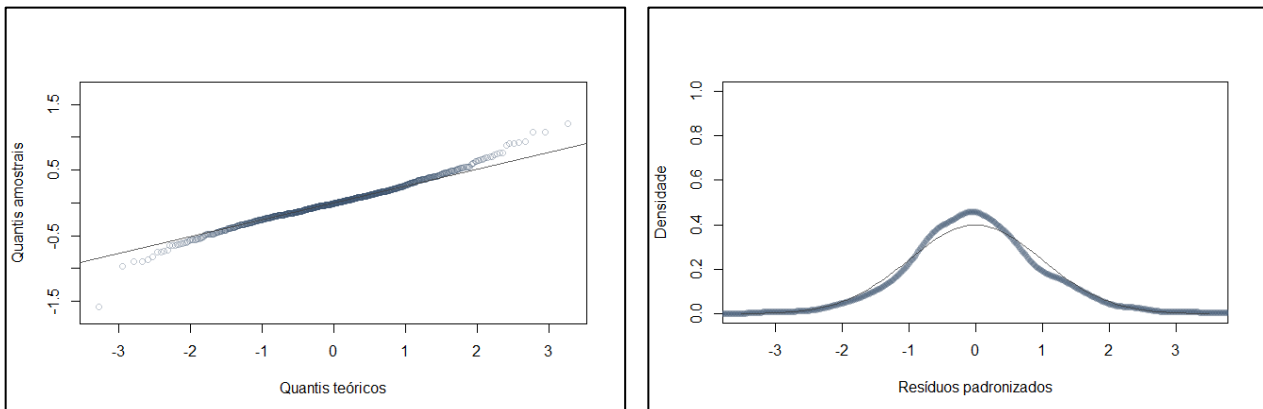


Figura 5 – Diagramas QQ e comparação entre as densidades teórica e empírica.

Partiu-se então para a simulação estocástica, na qual foram geradas 10.000 séries mensais de resíduos, todas de comprimentos igual a 77 anos (mesmo comprimento da amostra trabalhada). Tais resíduos foram adicionados às vazões observadas, de maneira a se obter realizações sintéticas das vazões médias mensais. Avaliou-se então, a ocorrência de falhas sequenciais no conjunto de séries sintéticas, sendo a falha definida como o não atendimento do Hidrograma de Consenso e conseqüentemente a impossibilidade de derivação de vazões para a operação da casa de força da UHE Belo Monte. Devido ao fato de o “Hidrograma B” ser mais restritivo à operação, exigindo maiores valores de vazões liberadas no TVR, apresenta-se, na Tabela 3, o resultado da simulação utilizando

as restrições do mesmo, com intuito de obter valores mais conservadores sobre as frequências de falhas sequenciais nas séries simuladas.

Tabela 4 - Ocorrências de falhas mensais sequenciais na série simulada.

Sequência de Falhas:	0	1	2	3	4	5	6
Ocorrência:	95,888%	3,174%	0,681%	0,183%	0,062%	0,011%	0,001%

Observa-se que em aproximadamente 95,89% do tempo não ocorrem falhas, ou seja, haverá vazões afluentes suficientes para a operação da UHE Belo Monte durante todo o ano, simultaneamente ao perfeito atendimento do Hidrograma de Consenso. Da mesma forma, verifica-se a ocorrência de 3,17% para a falha de um mês, 0,68% para falha em dois meses subsequentes, e 0,18% para falha em três meses subsequentes. Esses valores podem ser considerados relativamente baixos, tendo em vista a alta amplitude na variação sazonal das vazões no Rio Xingu frente aos valores impostos no Hidrograma de Consenso.

CONCLUSÕES

Por se tratar de um aproveitamento a fio d'água, e levando em consideração o fato de que no período em que não for possível a operação da UHE Belo Monte, haverá sempre a geração na UHE Pimental, turbinando a vazão a ser liberada para o TVR, pode-se concluir que a exigência de atendimento do Hidrograma de Consenso cumpre sua finalidade de estabelecer uma combinação entre o propósito do aproveitamento hidrelétrico e as demais necessidades mínimas dependentes da vazão do rio ao longo da Volta Grande do Xingu. Entretanto, não se deve desconsiderar o “*desperdício*” do potencial de geração em cada volume de água que deixa de ser turbinado na UHE Belo Monte, ao ser turbinado na UHE Pimental para atender o Hidrograma de Consenso, sendo esse impacto, informado no RIMA Belo Monte (2009), como uma redução de 7,2% na quantidade média de energia gerada, em relação aos estudos de viabilidade.

Observa-se que esta conclusão não diz respeito ao impacto das alterações feitas na concepção inicial do AHE Belo Monte, quanto à redução da eficiência energética e impacto na viabilidade econômica do mesmo, em função da eliminação do reservatório para acumulação hidráulica e opção pela operação a fio d'água. Este ponto é tema de inúmeras análises existentes já publicadas. Discutiu-se aqui o risco de não atendimento ao Hidrograma de Consenso no Trecho de Vazão Reduzida sob a ótica da disponibilidade hídrica. Nesse contexto, a análise desenvolvida permite a extensão da discussão quanto à adequabilidade do arranjo proposto, tanto em termos de eficiência energética, quanto de sustentabilidade ambiental.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais), ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH-UFMG), e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (EHR) da UFMG pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2011). *RESOLUÇÃO Nº 48 – Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos à Norte Energia S.A.*, 28 de fevereiro de 2011.

BAPTISTA DE SOUZA, D. D.; PALMA G. P. O.; MULLER, A. S. (2017). O Abandono no Brasil das Usinas Hidrelétricas com Reservatórios de Acumulação e seus Principais Impactos, In *Anais do XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Belo Horizonte, Maio, 2017.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.

KAMEL, K. F. S.; REYNAUD, F.; ARAÚJO FILHO, M. F.; GRUBE, R. (2017). Sistema de Manejo dos Igarapés do Canal de Derivação da UHE Belo Monte, In *Anais do XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Belo Horizonte, Maio, 2017.

LEME ENGENHARIA (2009). Capítulo 1: O Empreendimento. In *Relatório de Impacto Ambiental - Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte*. pp. 08-24.

LOUCKS, P. D. and BEEK, V.E. (2005) *Water Resources Systems Planning and Management an Introduction to Methods, Models and Applications*. Unesco, Paris, 690 p.