



I SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO
Integrando conhecimentos científicos em defesa do Velho Chico.

ANÁLISE DO EFEITO DA DEFASAGEM DE PICO DO HIDROGRAMA AMBIENTAL NO ATENDIMENTO DOS USOS NÃO CONSUNTIVOS NO BAIXO TRECHO DO RIO SÃO FRANCISCO

Micol Brambilla^{1}; Yvonilde D. P. Medeiros²; Andrea S. Fontes³*

Resumo – A degradação ambiental, assim como a operação de reservatórios são assuntos atuais no planejamento e gestão dos recursos hídricos do rio São Francisco. A rede ECOVAZÃO propôs um hidrograma ambiental para o baixo curso do rio São Francisco. Esse hidrograma tem sido utilizado em estudos sobre os impactos decorrentes da sua implementação para o setor elétrico e em discussões sobre as regras de operação de reservatório. Uma das sugestões resultante dessas discussões foi a defasagem do pico do hidrograma ambiental para facilitar na tomada de decisão da operação dos reservatórios e eventualmente diminuir os impactos negativos sobre a geração hidroelétrica. O presente artigo analisa o efeito decorrente dessa defasagem no atendimento aos usos não consuntivos no baixo trecho do rio São Francisco. Por meio da simulação de cenários de operação de reservatórios, que consideram as duas alternativas de hidrograma ambiental, pode ser observado o atendimento aos usos considerados. Os resultados não apresentaram diferenças significativas no atendimento às demandas não consuntivas, sendo a vantagem de defasar o pico do hidrograma ambiental atribuída apenas na fase de tomada de decisão sobre a operação dos reservatórios do rio São Francisco, por possibilitar verificação da situação hídrica da bacia prevista para o período.

Palavras – Chave: Hidrogramas ambientais; operação de reservatórios; atendimento aos usos não consuntivos

INTRODUÇÃO

Um instrumento amplamente utilizado para o aproveitamento de recursos hídricos é o reservatório de múltiplos usos. Reservatórios aprimoram o atendimento às demandas por água armazenando essa última e disponibilizando-a sob requerimento dos usuários. Para uma gestão eficiente desses, considerando os critérios de alocação hídrica adotados nas bacias hidrográficas, são feitos estudos de planejamento de reservatório onde são determinadas regras de operação.

Reservatórios também aportam alterações do regime de vazão que impactam negativamente no ecossistema e em aspectos socioeconômicos. Hidrogramas ambientais são adotados como medidas mitigadoras desses impactos. Portanto para implementar hidrogramas ambientais devem ser alteradas as regras de operação dos reservatórios. Foram desenvolvidos vários estudos com o objeto de investigar as implicações que a implementação de hidrogramas ambientais aportariam aos setores usuários de recursos hídricos. No intuito de encontrar um consenso entre os usuários diferentes regras de operação de reservatórios devem ser estudadas.

O rio São Francisco ocupa uma posição de grande importância vendo todos os usos por água representados e sendo a maior fonte hídrica de grande parte da região semiárida, além de representar mais de 90 % da potência hidroelétrica instalada no subsistema energético do Nordeste. A crescente demanda e a situação de baixa disponibilidade hídrica favoreceram uma situação ambiental crítica, principalmente na região do baixo trecho do rio, que percebe a influência dos barramentos situados a

montante. É para essa região que foram propostos hidrogramas ambientais para anos normais e secos (Medeiros *et al.*, 2010) e estão sendo desenvolvidos estudos de impactos decorrentes de suas implementações.

Ferreira (2014) analisou os impactos para o setor elétrico decorrentes da implantação do hidrograma proposto pela rede ECOVAZÃO (Medeiros *et al.*, 2010) para o baixo curso do rio São Francisco. Nas conclusões sugeriu analisar a possibilidade de deslocar o pico do hidrograma ambiental para melhor atender à demanda energética do subsistema Nordeste. Isso porque em seus resultados apresentaram-se dois picos anuais na geração energética.

Em discussões sobre o assunto a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) reforçou a necessidade de desenvolver estudos nessa direção. Deslocando o pico para frente o período de tomada de decisão sobre a operação da cascata de reservatórios a partir de Sobradinho antecipa o pico do hidrograma ambiental.

O objetivo deste artigo é analisar o efeito decorrente da defasagem de pico do hidrograma ambiental no atendimento aos usos não consuntivos de água para geração de energia, navegação e requerimento hídrico para a proteção do ecossistema aquático no baixo trecho do rio São Francisco.

METODOLOGIA

A metodologia escolhida para o alcance do objetivo da pesquisa foi a construção de cenários de alocação de água com base no critério de determinação de prioridades de atendimento às demandas hídricas. Os cenários alternativos se distinguem por regras de operação de reservatórios que se diferenciam pela variação das componentes do hidrograma ambiental considerado. Para auxiliar na análise de atendimento às demandas foi utilizada a simulação dos cenários de operação de reservatórios através da modelagem, pela qual foi escolhido um modelo matemático de rede de fluxo.

Foram feitas algumas considerações iniciais para diminuir as variáveis de ajuste e simplificar o sistema complexo do rio São Francisco. Foi analisada exclusivamente a calha principal da bacia hidrográfica, os usos consuntivos são intencionados como restrições e com isso suas vazões outorgadas, menos as vazões de retorno, são subtraídas das vazões observadas a montante do primeiro reservatório considerado, que é Sobradinho. Que é o primeiro aproveitamento hidroelétrico da cascata do rio São Francisco que faz parte do subsistema energético Nordeste e porque sendo o maior reservatório de regularização é o fator determinante das vazões no baixo trecho do rio São Francisco.

Também foram consideradas as principais regras operativas dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica para o atendimento aos múltiplos usos.

Coleta e tratamento de dados

As vazões de entrada dos reservatórios compreendem o período entre 2000 e 2015 e são, para o reservatório de Sobradinho, a soma das vazões observadas nas estações fluviométricas de Morpará (46360000) e Boqueirão (46902000) (ANA, 2015b), e para os restantes reservatórios as vazões naturalizadas incrementais (ONS, 2016a). As demandas consuntivas se identificam no Cadastro Nacional dos Usuários de Recursos Hídricos da ANA (2015a). Como demandas não consuntivas foram analisadas a geração de energia elétrica, a qual geração de referência se encontram no site do ONS (2016b), a navegação, com restrição de 1300 m³/s a jusante de Sobradinho e a proteção do ecossistema aquático, que se identifica nas vazões ambientais propostas por Medeiros *et al.* (2010).

Cenários de operação de reservatórios

Os cenários de operação de reservatórios desenvolvidos integram o meio ambiente como usuário dos recursos hídricos considerando suas necessidades hídricas e diferem pelas restrições de vazão mínima. Com o objetivo de testar uma alternativa que permita um compromisso entre a operação de reservatórios para o atendimento ao mercado elétrico e as necessidades do ecossistema

aquático foram construídos dois cenários de operação: o Cenário A considera os hidrogramas ambientais para anos normais e secos propostos por Medeiros *et al.* (2010) e o Cenário B considera os mesmos hidrogramas ambientais deslocados de 3 meses como sugerido por Ferreira (2014) para o período entre 2000 e 2015. A frequência de implementações de hidrograma ambiental para ano seco e para ano normal depende da situação do volume útil do reservatório de regularização, Sobradinho, no final de janeiro (ONS, 2014).

Simulação dos cenários de operação de reservatórios

Os cenários construídos são simulados através do modelo de gestão e planejamento de recursos hídricos *Water Evaluating and Planning System* WEAP desenvolvido pelo *Stockholm Environment Institute*. Esse modelo de rede de fluxo permite inserir diferentes cenários com facilidade, e apresenta os resultados de forma amigável. Segue a representação do sistema do rio São Francisco no WEAP, Figura 1.

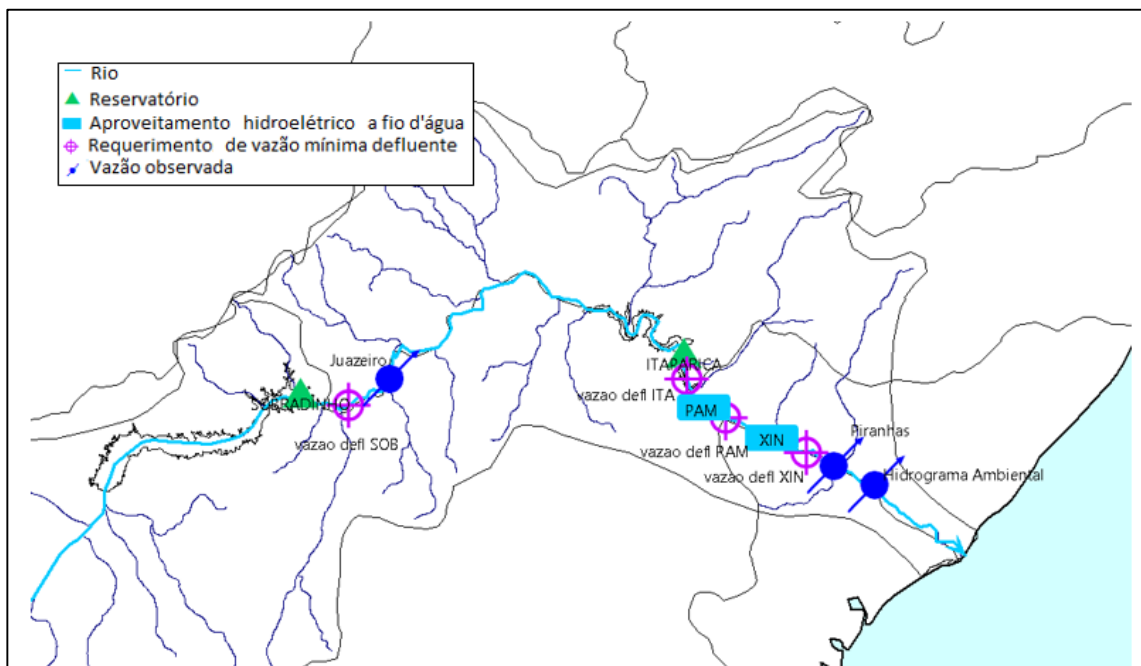


Figura 1 – Representação do rio São Francisco no WEAP

Fonte: Brambilla (2016)

Análise de atendimento às demandas não consuntivas

Como indicadores para a análise do desempenho no atendimento às demandas dos cenários de operação de reservatório foram utilizados os índices de confiabilidade (Equação 1) e vulnerabilidade (Equação 2) de atendimento (Hashimoto *et al.*, 1982).

A confiabilidade corresponde à probabilidade da demanda em estudo, i , ser atendida.

Equação:

$$Conf = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Z_i \quad (1)$$

Onde K é o número total de meses, e $Z_i = 1$ se o atendimento for satisfatório, $Z_i = 0$ caso contrário.

Um resultado satisfatório da confiabilidade prevê o atendimento às garantias adotadas para esse estudo que são de 99-100% para abastecimento humano e dessedentação animal, 95% para a energia elétrica e 90% pelas restantes demandas (CEARÁ, 1992 *apud* Mamede & Medeiros, 2009).

A vulnerabilidade analisa a magnitude do não atendimento a uma demanda.

Equação:

$$Vul = \frac{\sum_{j=1}^M S_i}{\sum_{j=1}^K D_i} * 100 \quad (2)$$

Onde S_i é o volume total deficitário da demanda i e D_i é o volume total da demanda.

RESULTADOS

Para o alcance do objetivo, foram inicialmente comparadas as vazões operadas a jusante de Xingó (ANA, 2015b) com os volumes operados de Sobradinho (ONS, 2016c) e os hidrogramas ambientais propostos (Medeiros, *et al.*, 2010; Ferreira, 2014). Como vazões operadas a jusante de Xingó foram adotadas as médias mensais das vazões observada na estação fluviométrica de Piranhas (49330000) entre 1995, que corresponde ao começo da operação completa da barragem de Xingó, e 2015. Os volumes úteis médios de Sobradinho incorporam o período entre 2000 e 2015.

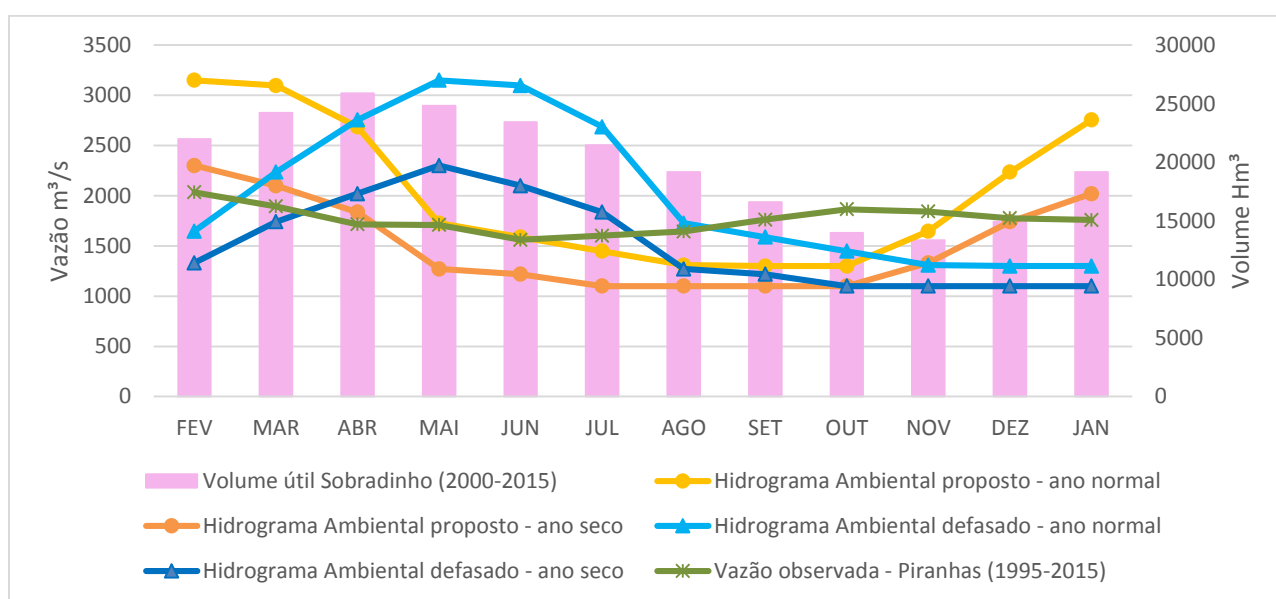


Figura 2 – Médias das vazões observadas a jusante de Xingó (estação Piranhas), dos volumes úteis observados em Sobradinho e hidrograma ambiental propostos, hidrograma ambiental com pico defasado
Fonte: Modificado de: ONS (2016c); ANA (2015b); Medeiros, *et al.* (2010); Ferreira (2014)

Observa-se na Figura 2 que o volume útil de Sobradinho apresenta seu período de enchimento entre dezembro e abril e período de esvaziamento entre maio e novembro. A vazão observada mostra um comportamento regularizado com leve pico no mês de fevereiro. O pico do hidrograma ambiental proposto (Medeiros *et al.*, 2010) é em fevereiro, época de enchimento de Sobradinho, e o do hidrograma ambiental com pico defasado de três meses, em maio, que corresponde ao começo do período de esvaziamento de Sobradinho. Considerando a hipótese que a vazão máxima do hidrograma ambiental é atendida com mais facilidade com reservatório cheio, o hidrograma ambiental com pico defasado deve apresentar índices de atendimento à restrição de vazão mínima melhores.

Através da simulação dos cenários de operação de reservatórios considerados pode ser analisado o atendimento às demandas não consuntivas e verificada a hipótese. A maior ênfase é dada ao atendimento da energia de referência, sendo que o cenário B nasce da vontade de diminuir a perda na geração hidroelétrica decorrente da implementação do hidrograma ambiental.

A Figura 3 ilustra a energia gerada nos cenários de operação simulados e a energia de referência, que corresponde à energia hidroelétrica gerada no subsistema Nordeste no período simulado. Identifica-se uma significativa sazonalidade da energia gerada nos cenários, em relação à energia de referência, imposta pela sazonalidade da restrição de vazão mínima, o hidrograma ambiental, à qual

é afiliada uma prioridade máxima de atendimento. Comparando a geração energética do cenário A com a do cenário B, identifica-se uma defasagem, consequência do deslocamento de pico da restrição de vazão mínima.

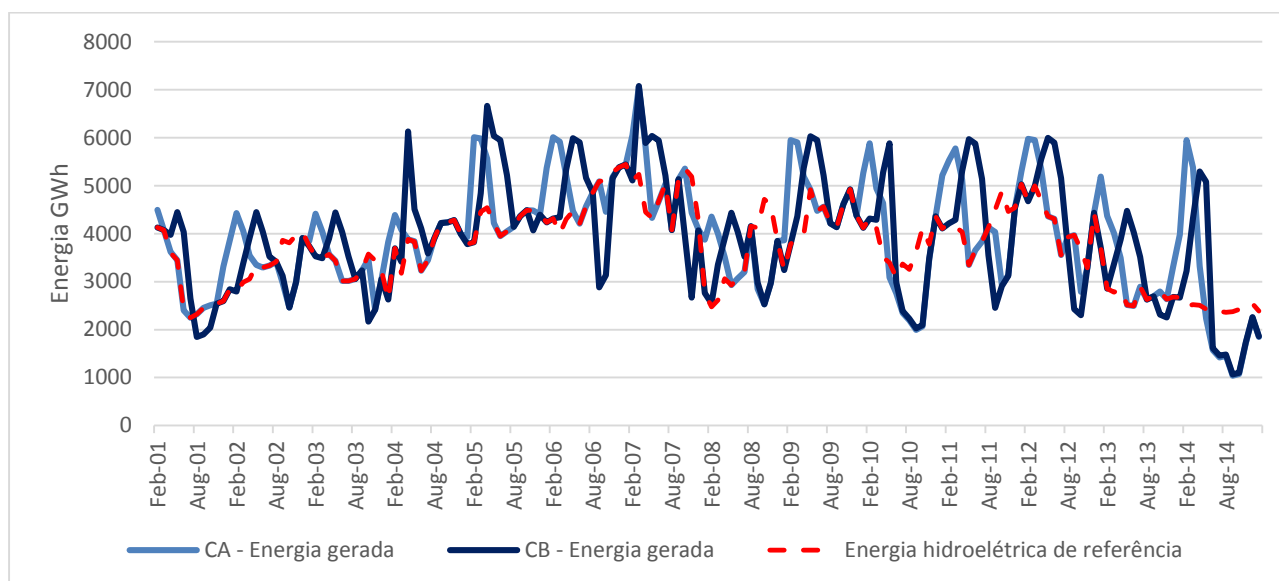


Figura 3 – Energia hidroelétrica de referência e energia gerada nos cenários A e B

Os valores resultantes da geração média dos cenários são muito parecidos, com 3922 GWh para o cenário A e 3908 GWh para o cenário B, e são de aproximadamente 5% maiores da média da energia hidroelétrica de referência.

Aplicando os índices de desempenho de sistemas hídricos para atendimento às demandas não consuntivas resultam os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Confiabilidade e Vulnerabilidade para os o cenário A e B dos usos de geração de energia, navegação e proteção do ecossistema aquático em %

	Confiabilidade			Vulnerabilidade		
	Geração de energia	Vazão remanescente	Navegação	Geração de energia	Vazão remanescente	Navegação
CA - Hidrograma Ambiental	79,76	86,11	86,90	4,42	3,86	2,37
CB - Hidrograma Ambiental pico defasado	76,19	87,78	85,12	5,53	4,76	2,70

Os resultados indicam que a energia de referência para o cenário A é atendido por aproximadamente 80% do tempo com volume total de atendimento de 95,5%. O cenário B apresenta resultados mais baixos de atendimento com 76% de atendimento no tempo e 94,5% de atendimento quantitativo – em MWh. Para o atendimento à navegação apresenta-se uma comportamento parecido com atendimento da demanda em 87% dos períodos simulados e com 97,7% da vazão requerida para o cenário A e 85% do tempo e 97,3% da quantidade atendidos para o cenário B. Enfim, observando o atendimento à restrição de vazão mínima o comportamento se inverte, com melhor atendimento para o cenário B. Esse porque no cenário B o pico do hidrograma ambiental é atendido no período onde reservatório de Sobradinho apresenta os maiores volumes armazenados.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O resultado do estudo demonstra que a defasagem do pico no hidrograma ambiental proposto pelos estudos da rede ECOVAZÃO não causa alterações relevantes no atendimento às demandas não consuntivas do baixo curso do rio São Francisco. O cenário A que considera o hidrograma ambiental proposto atende às demandas não consuntivas com valores de confiabilidade entre 80% e 87% e de

vulnerabilidade entre 2,5% e 4,5%. O cenário B, que adota uma hidrograma ambiental com pico defasado, alcança valores de confiabilidade entre 76% e 88% e de vulnerabilidade entre 2,5% e 5,5%.

Entretanto o deslocamento do pico do hidrograma ambiental diminui os riscos de não atendimento às demandas, principalmente da demanda energética. Isso porque o período no qual é determinada a situação hídrica da bacia acontece no começo de fevereiro o que significa, no caso do hidrograma ambiental com pico defasado, logo antes dos seus valores máximos. Com isso, por exemplo, em anos sem risco de grandes cheias o volume de espera de Sobradinho pode ser utilizado para armazenamento hídrico a partir de fevereiro, servindo eventualmente para o atendimento ao hidrograma ambiental. Dessa forma, colocando o pico do hidrograma ambiental depois do período de tomada de decisão evita liberar grandes quantidades de água em anos com limitada disponibilidade hídrica e permite que seja usado o volume de espera de Sobradinho para o atendimento ao hidrograma ambiental.

Esse comportamento se torna difícil de ser testado com um modelo simples de alocação de água. No caso simulado, as regras de operação são preestabelecidas, enquanto no sistema real as decisões são humanas e podem ser adaptadas às condições do momento. Nesse sentido é necessário fazer estudos avançados sobre a possibilidade de adoção do volume de espera para o atendimento ao hidrograma ambiental. Também se recomenda o monitoramento da fauna aquática do baixo trecho do rio São Francisco para avaliação das consequências da implementação do hidrograma com pico defasado no ecossistema aquático.

AGRADECIMENTO

Agradeço à FINEP e CNPq pelo apoio ao projeto de pesquisa AIHA.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Coordenação de Outorgas*. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/institucional/SobreaAna/uorgs/sof/geout.aspx>> Acesso em: março 2015a.

_____. *Séries hidrológicas*. Banco de dados Hidroweb. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em: setembro 2015b.

BRAMBILLA, M. (2016). Análise econômica de cenários de operação de reservatórios considerando o hidrograma ambiental para o baixo curso do rio São Francisco. 154 f. Dissertação – Departamento de Engenharia Ambiental, *Universidade Federal da Bahia*, Salvador.

FERREIRA, T.V.B. Subsídios para o estudo de hidrogramas ambientais para o baixo curso do rio São Francisco: Avaliação de impactos sobre a geração hidrelétrica. 2014. 284 f. Dissertação - Engenharia Civil, *Universidade Federal de Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro.

HASHIMOTO, T., STEDINGER, J., LOUCKS, D.P. (1982). Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, 18 (1), pp. 14-26.

MAMEDE, G.L.; MEDEIROS, P.H.A. (2009). Variabilidade da curva de garantia de oferta hídrica para diferentes intervalos de simulação: o caso do reservatório orós. In *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande, novembro 2009.

MEDEIROS, Y.D.P.; PINTO, I.M.; STIFELMAN, G.M.; FARIA, A.S.F.; PELLI, J.C.S.; RODRIGUES, R.F.; SILVA, E.R.; COSTA, T.; BOCCACIO, M.X.; SILVA, E.B.G. Projeto 3.1 - Participação Social no Processo de Alocação de Água, no Baixo Curso do Rio São Francisco. In: *Estudo do regime de vazão ecológica para o Baixo curso do rio São Francisco: Uma abordagem multicriterial*. Universidade Federal da Bahia, 2010. (Relatório Técnico – CNPQ/CT-HIDRO)

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. (2014). *Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias* - Bacia do Rio São Francisco (Ciclo 2014-2015).

_____. *Séries históricas de vazões*. Período 1931-2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx> Acesso em: março 2016a.

_____. *Geração de energia*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx> Acesso em: março 2016b.

_____. *Volume útil dos principais reservatórios*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx> Acesso em: abril 2016c.