

# IMPACTO DA ADOÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO SOBRE A GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

*Flávia Bezerra Amorim<sup>1</sup>, Lafayette Dantas da Luz<sup>2</sup>, Fernando Genz<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- Este artigo discute uma abordagem para o processo de determinação de vazões ecológicas, baseada no “paradigma das vazões naturais” proposto por Poff *et al.* (1997). Os estudos desenvolvidos visaram identificar o impacto sobre a geração hidrelétrica na hipótese de adoção de um regime dinâmico de vazões (RDV) no baixo trecho do Rio São Francisco. Isso foi realizado por meio de simulação de cenários, os quais se propõem a atender demandas ambientais e ecológicas, em condição distinta das vazões mínimas atuais mantidas a jusante dos barramentos. Para essa simulação foi usado esquema matemático de fluxos em rede, com o modelo ‘AcquaNet’, computando-se a potência gerada pelo sistema de usinas hidrelétricas da CHESF em termos médios mensais. Um bloco de simulações foi realizado considerando diferentes condições hídricas da bacia, nas quais as exigências quanto a RDVs mudavam para cada condição, correspondendo a situações hipotéticas de utilização da previsão climática na operação dos reservatórios. Dos diversos resultados obtidos, verifica-se que seria plausível se praticar certos regimes de vazões, contemplando momentos de cheias e vazantes que reproduzam parcialmente condições do regime natural e, ainda, considerando restrições impostas por condicionantes atualmente considerados, sem comprometer significativamente a produção hidrelétrica.

**ABSTRACT** --- This paper deals with the process of determining environmental flows taking into account the "paradigm of the natural flow" proposed by Poff *et al.* (1997). The studies aimed to identify the impact on hydropower generation resulting from the adoption of a dynamic flows' regime for the lower reach of San Francisco River. This was done through simulation of scenarios that aims to provide environmental benefits, condition distinct from the currently adopted minimum flow released downstream the dams. This simulation was carried out by using mathematical scheme of flows in network, using the model 'AcquaNet'. Generated power by the hydroelectric system was computed on averaged monthly basis. The simulated dynamic flows' regimes were considered with and without constraints for the maximum and minimum flows. A set of simulations was done considering different hydric conditions in which the requirements for dynamic flows regime switch for each condition. This approach mimics the situation of applying climate prediction in reservoirs operation. The obtained results imply that is reasonable to implement dynamic flows regime downstream the dams, including events of floods and low-flows that partially reproduce some conditions of the natural regime, also considering restrictions imposed by the current reality.

**Palavras-Chave:** Vazão Ecológica, Usinas Hidrelétricas, Rio São Francisco

---

1) Engenheira Sanitarista e Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental Urbana (UFBA). Rua Aristides Novis, 02, Federação, Salvador/BA, 40210-630. e-mail: [fauamorim@yahoo.com.br](mailto:fauamorim@yahoo.com.br)

2) Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. Rua Aristides Novis, 02, Federação, Salvador/BA, 40210-630. Orientador. e-mail: [lluz@ufba.br](mailto:lluz@ufba.br)

3) Pesquisador do CNPq/CT-ENERG no Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. Rua Aristides Novis, 02, Federação, Salvador/BA, 40210-630. Co-orientador. e-mail: [rajendra.br@gmail.com](mailto:rajendra.br@gmail.com)

# 1 INTRODUÇÃO

O rio São Francisco nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, a aproximadamente 1.200m de altitude, atravessa o Estado da Bahia, fazendo a divisa deste Estado ao norte com Pernambuco e a divisa natural dos Estados de Sergipe e Alagoas, antes de desaguar no Oceano Atlântico, completando uma extensão de 2.863 km (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004). A bacia do rio São Francisco possui uma área de aproximada de 639.000 km<sup>2</sup> e subdividi-se em trechos alto, médio, submédio e baixo.

No curso submédio da bacia do rio São Francisco, cinco represamentos e oito usinas hidrelétricas estão instalados em série, fornecendo energia para o Sistema Interligado Nacional (SIN) (Figura 1).



Figura 1 - Usinas Hidrelétricas em operação com potência acima de 30MW.

Fonte: ANA/GEF/PNUMA/OEA (2004)

O primeiro aproveitamento hidrelétrico instalado foi o complexo Paulo Afonso – Moxotó com início das obras de Paulo Afonso I em 1948. Em 1979, todas as UHEs do complexo já estavam em operação. Em seguida foram instaladas as UHEs dos reservatórios de Sobradinho, Itaparica e Xingó (Quadro 2).

Quadro 1: Início das obras e operação das usinas hidrelétricas localizadas no submédio e baixo trecho do rio São Francisco.

<b>USINAS HIDRELÉTRICAS</b>	<b>INÍCIO DAS OBRAS</b>	<b>INÍCIO DE OPERAÇÃO</b>
Paulo Afonso I	1948	1955
Paulo Afonso II	1955	1961
Paulo Afonso III	1967	1971
Apolônio Sales (Moxotó)	1971	1977
Paulo Afonso IV	1972	1979
Sobradinho	1973	1979
Luiz Gonzaga (Itaparica)	1979	1988
Xingó	1987	1994

Fonte: [www.chesf.gov.br](http://www.chesf.gov.br)

O foco deste artigo são as usinas hidrelétricas instaladas no trecho submédio do rio São Francisco e o regime hidrológico no baixo curso do rio, situando-se em áreas dos Estados de Sergipe e Alagoas.

Ao longo de diversos trechos do rio São Francisco, formam-se às suas margens lagoas que se ligam ao seu leito principal no período chuvoso. Porém tem-se observado uma grande redução no número de lagoas marginais em um período mais acelerado do que ocorria normalmente. Diversos são os fatores deste processo, principalmente, os represamentos em cascata no trecho submédio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004).

Constata-se, por meio do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio São Francisco, que as informações disponíveis sobre a ecologia fluvial do baixo trecho do rio são insuficientes para a definição de um regime de vazões ecológicas que garanta a biodiversidade do sistema rio-planície de inundação. Então, foi adotado valor de 1.300m<sup>3</sup>/s como vazão mínima ecológica na foz, até a realização de novos estudos para confirmação desse valor ou revisão utilizando outras metodologias. Porém, a ONS (2007) recomenda a redução para valores iguais ou inferiores a 1.100m<sup>3</sup>/s quando necessário, por meio de instrumento legal, com a finalidade de proporcionar maior armazenamento nos reservatórios.

No Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco está sinalizado o desenvolvimento de estudo para o estabelecimento de um regime de vazões ecológicas como prioridade imediata, conforme deliberação do comitê.

De acordo com O’Keeffe (2006), o regime de vazões ecológicas compreende um fluxo adequado em quantidade, qualidade e sincronismo com o ecossistema local, considerando os

múltiplos usos da água. Isso significa que para ter uma vazão ecológica em um rio tem que haver estudos multidisciplinares com objetivos de atender aos diversos usos das águas em termos qualitativos, incluindo a demanda ambiental como uma necessidade preferencial.

Em conjunto com estudos hidrológicos e ecológicos, que são fundamentais para a definição de vazões ecológica, têm sido agregados aspectos socioeconômicos e culturais das comunidades ribeirinhas como forma de equilibrar as demandas por água entre os diversos grupos de interesse.

Neste trabalho, foram identificados os aspectos naturais do regime hidrológico do rio São Francisco que é a primeira etapa para o estudo de vazões ecológicas e deve estar de acordo com as características fluviais antes da interferência das barragens. Para a simulação hidrológica, é importante ressaltar que foram determinados regimes de vazões com padrões hidrológicos semelhantes ao regime natural do rio e não exatamente a vazão ecológica, pois esta última requer estudos multidisciplinares e não apenas a quantidade de água que deve ser mantida. Por isso, nesse trabalho foi utilizada a expressão 'Regime Dinâmico de Vazão' (RDV) ao invés de 'Regime de Vazão Ecológica', que compreende uma idéia mais ampla. Porém, a identificação de um regime hidrológico que atenderia as demandas ambientais é um primeiro passo para chegar a um regime de vazão ecológica, e isso não deve ser desprezado.

Este artigo visa avaliar o impacto na geração hidrelétrica decorrente da adoção de um regime dinâmico de vazões no trecho baixo do rio São Francisco, por meio de simulação de cenários de demandas ambientais, distintas das vazões mínimas atuais a jusante dos barramentos.

## **2 VAZÃO ECOLÓGICA**

A implantação de barragens em um curso d'água tem diversas finalidades voltadas para o desenvolvimento econômico e social de uma região, tais como geração de energia elétrica, retenção de água para irrigação, abastecimento de cidades, controle de inundações etc. Com isso, o regime fluvial passa a ser controlado para suprir as demandas de uso da água pelo homem, atenuando cheias e secas a fim de tornar o rio e a disponibilidade hídrica regularizados.

A regularização do rio por barragens provoca uma descontinuidade longitudinal formando a montante um ambiente lântico e a jusante um ambiente lótico com alterações na variabilidade das vazões. O controle artificial na dinâmica hidrológica altera as magnitudes e frequências dos fluxos verticais e laterais, afetando todo o sistema fluvial, tanto no leito quanto nas planícies de inundação e lagoas marginais (HENRY, 1999).

A desaceleração do fluxo ao atingir a zona do reservatório propicia a deposição de sedimentos no fundo, assoreando o leito e aumenta a largura do rio nesta seção, inundando as planícies ao redor por um período mais prolongado do que ocorria naturalmente ou até permanentemente. Ao contrário do que ocorre a montante, nos trechos a jusante há uma redução da área inundada

impactando a conexão entre as lagoas da planície fluvial, assim as planícies ficam expostas durante todo o ano ou submersas em períodos irregulares, prejudicando espécies de peixes migratórias que desovam a montante das barragens, mas alimentam-se e crescem nas lagoas marginais (BIZERRIL; PRIMO, 2001).

A regularização do fluxo dos rios traz prejuízos ecológicos em todo o sistema fluvial, tanto no leito quanto nas planícies de inundação. Para minimizar os problemas gerados pela implantação de barragens foram desenvolvidas metodologias para determinar o quanto de água deve ser mantido no leito do rio a fim de proteger o ecossistema aquático.

Ao longo das últimas décadas, existiu apenas a idéia de manutenção de uma vazão mínima no leito do rio, acreditando-se que assim a fauna e flora estariam sobrevivendo em condições satisfatórias. Porém, diversos estudos (COLLISCHONN *et al.*, 2005; LUZ *et al.*, 2005; O'KEEFFE, 2006; RICHTER *et al.*, 2003) afirmam que a saúde do ambiente aquático-terrestre depende da variação sazonal da vazão do rio e não de um nível médio ao longo de todo ano. Essa variação sazonal com o propósito de proteção ambiental é denominada de regime de vazões ecológicas que incluindo os múltiplos usos, forneceria ao ecossistema aquático condições mais adequadas.

Diversos autores (RICHTER *et al.*, 1997; Keddy, 2000; RICHTER *et al.*, 2003; LUZ *et al.*, 2004; COLLISCHONN *et al.*, 2005; O'KEEFFE, 2006) defendem um regime de vazões ecológicas de forma a preservar as características peculiares a cada época do ano, ao contrário dos métodos tradicionalmente utilizados que definem uma vazão mínima única que não reflete a realidade natural. Com o intuito de suprirem falhas encontradas em métodos estritamente hidráulicos e hidrológicos, surgiram metodologias que incluem nas suas etapas as necessidades do ecossistema e a solução de forma participativa.

No caso do baixo curso do rio São Francisco, não há estudos sobre a ecologia fluvial, sendo utilizado o método hidrológico de Montana, por ser mais simples, para a determinação da vazão mínima ecológica na Foz. Os métodos tradicionais para determinação de vazões mínima ecológica dão subsídios à determinação de regimes dinâmicos de vazão, desde que adaptados de modo a atender a sazonalidade fluvial e as necessidades ambientais de cada bacia hidrográfica. É assim que as metodologias holísticas têm sido aplicadas, utilizando métodos hidrológicos e hidráulicos em associação com os efeitos das alterações hidrológicas sobre os aspectos sócio-econômicos, reconhecendo as interações ecológicas e o homem como parte de um mesmo ecossistema.

### **3 METODOLOGIA**

Foi empregada a metodologia detalhada adiante, para a determinação dos padrões hidrológicos propostos para o Regime Dinâmico de Vazão (RDV) a ser praticado a jusante do sistema de usinas hidrelétricas da CHESF (baixo trecho do rio), visando atingir o objetivo de

identificar as perdas na geração hidrelétrica em decorrência da adoção desse regime, por meio de simulação de diferentes cenários, cujos RDV representariam um atendimento que atualmente é desconsiderado.

### 3.1 Obtenção dos dados

Para a determinação dos regimes dinâmicos de vazão foi utilizada a série de vazões naturais diárias da UHE Xingó reconstituídas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e utilizadas para a operação do SIN (Sistema Interligado Nacional). A série de vazões naturais se estende de 1931 a 2003, e representa uma situação do regime hidrológico sem a regularização pelos reservatórios. As séries de vazões naturais são calculadas a partir dos dados observados e das informações sobre as demandas de água para os usos não consuntivos e usos consuntivos (ANEEL; OMM, 2004).

### 3.2 Determinação do regime dinâmico de vazão

Quando se analisa uma alteração hidrológica, a variabilidade climática interanual que ocorre naturalmente interfere na compreensão do problema, pois um ano em que houve pouca chuva e, conseqüentemente, baixos níveis fluviométricos, pode ser confundido com um impacto causado pelo reservatório, conduzindo a resultados equivocados (GENZ; LUZ, 2007). Por isso, é necessário discriminar, em uma série histórica de dados hidrológicos, anos que apresentaram características climáticas de estiagem dos anos chuvosos.

Com o objetivo de ter uma confiabilidade nos resultados, foi utilizado o índice ‘Condição Hídrica da bacia hidrográfica’ (CHid), que classifica as vazões anuais em ‘muito seca’, ‘seca’, ‘média’, ‘úmida’ e ‘muito úmida’, de acordo com a proposta de Genz e Luz (2007).

A condição hídrica da bacia hidrográfica (CHid) é definida com base nas vazões naturais, pela expressão:

$$Anomalia = (Q - Qlp) / \sigma \quad | \quad (1)$$

Onde:

$Q \Rightarrow$  vazão média anual;

$Qlp \Rightarrow$  vazão média de longo período – corresponde à média das vazões médias diárias anuais;

$\sigma \Rightarrow$  desvio padrão das vazões médias anuais.

Para considerar a variabilidade climática na determinação de regimes de vazão ecológica é necessário obter a previsão da precipitação e variáveis climáticas, estimadas por modelos meteorológicos e de clima, e associar com modelos hidrológicos Chuva-Vazão, para conhecer em curto e longo prazo a previsão de vazões afluentes aos reservatórios. As condições de afluência nos reservatórios das usinas hidrelétricas influenciam na geração de energia e na vazão a jusante do sistema (ANEEL; OMM, 2004). Realizando-se uma previsão hidroclimática é possível utilizar o

índice de condição hídrica da bacia hidrográfica para indicar qual regime de vazão ecológica deverá ser mantido a jusante de reservatórios, equilibrando o atendimento entre as demandas ambientais e de geração hidrelétrica.

Depois de identificadas as condições hídricas de cada ano da série de vazões naturais, são identificados os padrões hidrológicos do rio, por condição hídrica. Cada ano possui características particulares, colocando em evidência as diferenças interanuais de vazões.

A partir da série de vazões naturais, são delineados regimes dinâmicos de vazão por condição hídrica visando representar a variabilidade e o sincronismo do regime fluvial. Para isso foi utilizado o método da curva de permanência mensal a partir de dados diários de vazão, pois assim é possível contemplar a sazonalidade mensal na adoção de vazões ecológicas, conforme proposto por Cruz (2001) (Figura 2).

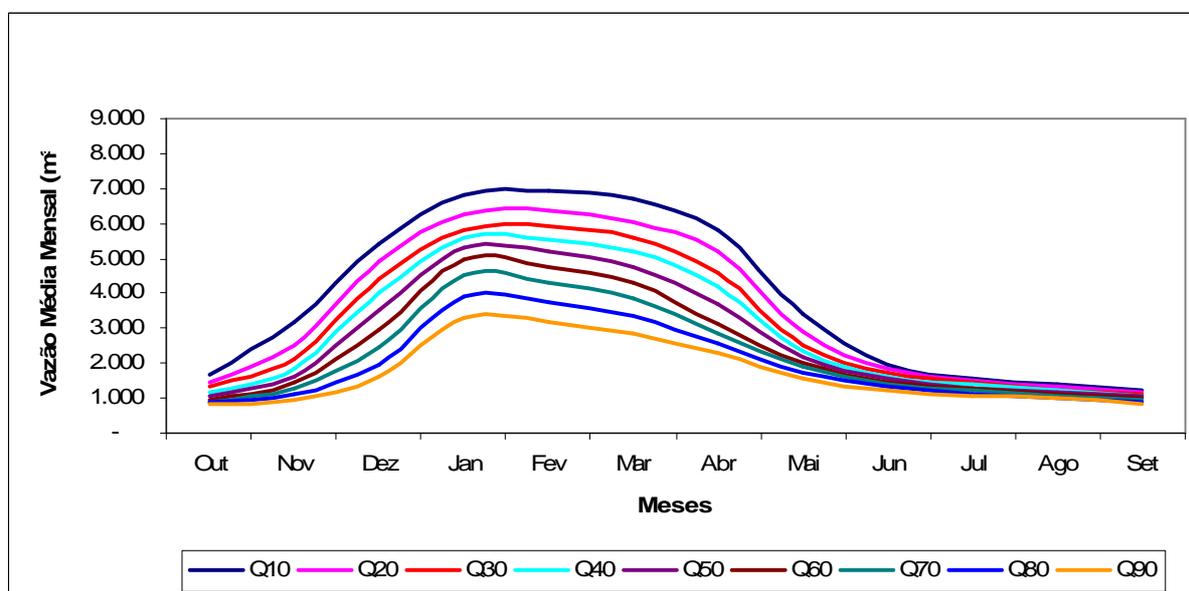


Figura 2 - Regimes dinâmico de vazão ( $m^3/s$ ) representando, cada um, uma seqüência de permanências mensais para uma condição hídrica 'média'

No caso em estudo, para a determinação de um regime dinâmico de vazão (RDV), foram extraídos de cada curva valores de vazões com permanências de 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 e 10%, construindo 9 regimes dinâmicos de vazão para cada CHid, totalizando 36 RDVs. Esses regimes dinâmicos de vazão constituíram a demanda ambiental nos cenários de simulação hidrológica, de acordo com a condição hídrica, do baixo trecho do rio São Francisco no intervalo de ano de 1932 a 2003.

### 3.3 Modelo de simulação do sistema hídrico

No sistema em estudo, após a proposição dos regimes dinâmicos de vazão com permanências diferentes, para a finalidade de atender demandas ambientais e ecológicas, partiu-se para a

simulação de cenários a fim de compreender o comportamento do sistema em situações distintas e verificar a perda de potência gerada em cada situação.

Para isso, foi utilizado o *software* ‘LabSid AcquaNet’ que é um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas, originado do modelo MODSIM (LABADIE, 1988). O modelo ‘AcquaNet’ tem sido utilizado em diversos trabalhos e órgãos de gestão de recursos hídricos (FARIA, 2003; LERNER, 2006; ROBERTO, 2002) para analisar sistemas complexos de aproveitamento de recursos hídricos.

O *software* ‘LabSid AcquaNet’ permite a representação esquemática do problema, utilizando dados mensais de vazão em todos os elementos do sistema. A inserção de dados mensais no sistema a ser simulado é importante para avaliar uma demanda ambiental com comportamento sazonal.

Para a simulação foram escolhidos onze casos de demanda ambiental no baixo trecho do rio São Francisco:

- Caso sem restrição: simulando sem restrições de vazão para a demanda ambiental;
- Caso de restrição 1.300 m<sup>3</sup>/s: utilizando a restrição mínima atual de vazão;
- Casos de regime dinâmico de vazão: RDVs variando conforme e respectivos à cada condição hídrica de cada ano:
  - Caso Q<sub>X</sub> – demanda ambiental mensal equivalente a vazão cuja permanência é X% em cada mês. Para X foram consideradas as permanências 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90%.

Foram realizadas três rodadas de simulação, mais uma rodada com o caso sem restrição, para a obtenção de cenários e situações distintas de forma a auxiliar o processo de tomada de decisão, considerando nesse trabalho apenas questões hidrológicas.

Na 1ª rodada, a partir da série de vazões naturais foram extraídas curvas de permanência mensal sem classificar os anos da série em condições hídricas. Essa 1ª rodada foi realizada para comparar seu resultado com a 2ª rodada de simulação, na qual os anos da série de vazões naturais foram classificados de acordo com as condições hídricas. Nas duas rodadas foram extraídas de cada curva mensal as permanências Q10, Q20, Q30, Q40, Q50, Q60, Q70, Q80 e Q90 para construir os regimes dinâmicos de vazões.

Na 1ª e na 2ª rodada de simulação não foi utilizada nenhuma limitação para os valores máximos e mínimos de vazão, visando uma simulação com valores de vazão que ocorreriam em condições naturais se não houvesse o sistema de reservatórios no trecho submédio do rio São Francisco. Na 3ª rodada de simulação, foram utilizados os RDVs das permanências simuladas na 2ª rodada, porém truncados para valores máximos e mínimos, com o objetivo de atender o que indicam o Plano Anual de Prevenção de Cheias (Q<sub>máx</sub> 8.000m<sup>3</sup>/s), o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Q<sub>mín</sub> 1.300m<sup>3</sup>/s) e a curva bianual de aversão a risco

para a região Nordeste (Qmín 1.100m<sup>3</sup>/s). Isso significa contemplar em parte os múltiplos usos do rio São Francisco, na forma como hoje é praticado.

Para a determinação da série mensal de demandas ambientais dos cenários de simulação, foram utilizados os regimes dinâmicos de vazão ordenados segundo as condições hídricas do período simulado (1932 a 2003). O revezamento de condições hídricas no ambiente – seca a muito úmida – permite usufruir os benefícios ambientais que cada característica hidrológica isoladamente não forneceria.

A partir da situação de referência, obteve-se a variação de potência em cada uma das situações simuladas, possibilitando a análise de perda do potencial de energia gerada diante da imposição de um regime de vazões a serem mantidas a jusante da UHE de Xingó, com o objetivo de atender benefícios ambientais e ecológicos do baixo curso do rio São Francisco.

A simplificação adotada neste trabalho não leva em conta a demanda por energia elétrica, nem a operação em rede do sistema elétrico brasileiro. O impacto é avaliado pelo valor da potência gerada no sistema de usinas hidrelétricas em diferentes cenários de demandas ambientais. Esta aproximação da realidade foi realizada a partir de médias mensais, apesar de existirem variações diárias e horárias na geração de energia em decorrência de variações na demanda por energia elétrica.

#### **4 RESULTADO: GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA EM FUNÇÃO DA ADOÇÃO DE REGIMES DINÂMICOS DE VAZÕES**

Os resultados da simulação hidrológica sem restrição de vazão no baixo trecho do rio São Francisco foram utilizados como valores de referência para a verificação da potência perdida. A potência gerada no sistema de referência foi 4.525.632,04 MW, em 72 anos de simulação, em média 62.856,00 MW por ano.

##### **4.1 Primeira rodada de simulação**

Apenas nos casos de restrição Q90, 1.300 m<sup>3</sup>/s, Q80 a demanda ambiental no baixo trecho do rio São Francisco foi atendida totalmente. Nos demais casos as vazões fornecidas para suprir a demanda ambiental foram abaixo do necessário em alguns meses, mesmo sendo atribuída prioridade máxima de atendimento. Como é esperado, quanto menor a permanência da vazão, representada pelas maiores vazões, é mais difícil manter o atendimento sem falhas (Quadro 2).

Quadro 2: Frequencia com que ocorrem vazões abaixo da demanda ambiental necessária.

Casos	Freqüência abaixo da demanda ambiental necessária (%)
<b>Restrição 1.300m<sup>3</sup>/s</b>	0
<b>RDV Q10</b>	87,85
<b>RDV Q20</b>	75,23
<b>RDV Q30</b>	62,38
<b>RDV Q40</b>	47,57
<b>RDV Q50</b>	32,87
<b>RDV Q60</b>	13,31
<b>RDV Q70</b>	5,44
<b>RDV Q80</b>	0
<b>RDV Q90</b>	0

Verifica-se que com o aumento da permanência das vazões do regime dinâmico houve menor perda energética nas usinas hidrelétricas, que variou de 18,2 a 99,1%, correspondendo aos RDV Q90 e Q10, respectivamente (Quadro 3).

Quadro 3: Potência perdida (%) em relação ao caso sem restrição por situação simulada

RDV Q90	Restrição 1300m <sup>3</sup> /s	RDV Q80	RDV Q70	RDV Q60	RDV Q50	RDV Q40	RDV Q30	RDV Q20	RDV Q10
18,2	30,1	31,5	47,2	65,5	76,1	82,3	88,0	93,1	99,1

A restrição de 1.300 m<sup>3</sup>/s, adotada atualmente, apresentou uma potência perdida de 30,1%, superior a potência perdida no caso de RDV Q90 (18,2%). Fazendo análise comparativa entre os dois casos observou-se que no caso Q90 todas as UHE passaram menos tempo com déficit de energia (potência desejada - potência gerada) do que no caso de referência 1.300 m<sup>3</sup>/s (Quadro 4).

Quadro 4: Frequencia em que cada UHE gerou abaixo da potência desejada.

<b>QUADRO COMPARATIVO: CASOS Q90 - 1.300m<sup>3</sup>/s</b>		
<b>Freqüência abaixo da potência desejada (%)</b>		
<b>Usinas</b>	<b>Caso Q90</b>	<b>Caso 1.300m<sup>3</sup>/s</b>
<b>Complexo PAM</b>	81,71	82,52
<b>Itaparica</b>	77,20	78,82
<b>Sobradinho</b>	77,43	78,59
<b>Xingó</b>	63,31	65,74

Na primeira rodada de simulação, o caso que melhor favorece a geração de energia é o que utiliza a Q90 mensal para determinação do regime dinâmico de vazão, produzindo um impacto de 18,2% em 72 anos de operação, enquanto que a restrição adotada atualmente leva a um impacto de 30,1%, de acordo com a simulação realizada.

Apesar do regime dinâmico de vazão no caso Q90 possuir uma demanda ambiental acima de 1.300 m<sup>3</sup>/s nos meses mais chuvosos (máximo de 2.599 m<sup>3</sup>/s), este caso foi o que apresentou maior potência gerada da série histórica. Porém as vazões nos meses mais secos são abaixo de 1.300 m<sup>3</sup>/s

(mínimo de 761 m<sup>3</sup>/s), compensando os meses de cheia o que favorece a geração de energia e o atendimento dos reservatórios ao volume meta.

#### 4.2 Segunda rodada de simulação

Apenas nos casos de RDV Q90, 1.300 m<sup>3</sup>/s, Q80, Q70 a demanda ambiental no baixo trecho do rio São Francisco foi atendida totalmente. Nos demais casos as vazões fornecidas para suprir a demanda ambiental foram abaixo do necessário em alguns meses, mesmo sendo atribuída prioridade máxima de atendimento. Como é esperado, quanto menor a permanência da vazão, representada pelas maiores vazões, é mais difícil manter o atendimento sem falhas (Quadro 5).

Quadro 5: Frequência com que ocorrem vazões abaixo da demanda ambiental necessária.

Casos	Frequência abaixo da demanda ambiental necessária (%)
<b>Restrição 1.300m<sup>3</sup>/s</b>	0
<b>RDV Q10</b>	92,59
<b>RDV Q20</b>	81,13
<b>RDV Q30</b>	62,38
<b>RDV Q40</b>	40,63
<b>RDV Q50</b>	17,25
<b>RDV Q60</b>	1,74
<b>RDV Q70</b>	0
<b>RDV Q80</b>	0
<b>RDV Q90</b>	0

Verifica-se que com o aumento da permanência das vazões do regime dinâmico houve menor perda energética nas usinas hidrelétricas, que variou de 20,1 a 99,7%, correspondendo aos RDV Q90 e Q10, respectivamente (Quadro 6).

Quadro 6: Potência perdida (%) em relação ao caso sem restrição por situação simulada

RDV Q90	Restrição 1300m <sup>3</sup> /s	RDV Q80	RDV Q70	RDV Q60	RDV Q50	RDV Q40	RDV Q30	RDV Q20	RDV Q10
20,1	30,1	32,8	52,3	76,4	94,8	98,7	99,3	99,6	99,7

De acordo com o resultado das simulações nota-se que o caso em que se adotou o regime dinâmico de vazão com permanência mensal de 90% apresentou maior geração de energia na série histórica do que o caso em que se adotou a restrição de 1.300 m<sup>3</sup>/s mensal em todo o período, restrição atual a jusante dos reservatórios.

Fazendo análise comparativa entre estes dois casos vê-se que no caso Q90 apenas a UHE Sobradinho apresentou maior frequência gerando abaixo da potência desejada. Todas as outras usinas passaram menos tempo com déficit de energia (potência desejada - potência gerada) do que no caso de referência 1.300 m<sup>3</sup>/s (Quadro 7).

Quadro 7: Frequencia em que cada UHE gerou abaixo da potência desejada.

<b>QUADRO COMPARATIVO: CASOS Q90 - 1.300m<sup>3</sup>/s</b>		
<b>Frequencia abaixo da potência desejada (%)</b>		
<b>Usinas</b>	<b>Caso Q90</b>	<b>Caso 1.300m<sup>3</sup>/s</b>
<b>Complexo_PAM</b>	81,83	82,52
<b>Itaparica</b>	77,20	78,82
<b>Sobradinho</b>	77,20	77,08
<b>Xingó</b>	62,50	65,28

Na segunda rodada de simulação, o caso que melhor favorece a geração de energia é o que utiliza a Q90 mensal para determinação do regime dinâmico de vazão, produzindo um impacto de 20,1% em 72 anos de operação, enquanto que a restrição adotada atualmente leva a um impacto de 30,1% (1.300 m<sup>3</sup>/s), de acordo com a simulação realizada.

Apesar do regime dinâmico de vazão no caso Q90 possuir uma demanda ambiental muito acima de 1.300 m<sup>3</sup>/s nos meses mais chuvosos e nos anos de condições hídricas mais úmidas (máximo de 7.101 m<sup>3</sup>/s), este caso foi o que apresentou maior potência gerada da série histórica. Porém as vazões nos meses mais secos são abaixo de 1.300 m<sup>3</sup>/s (mínimo de 660 m<sup>3</sup>/s), compensando os meses de cheia o que favorece a geração de energia e o atendimento dos reservatórios ao volume meta.

### 4.3 Terceira rodada de simulação

O regime dinâmico de vazão da terceira rodada de simulação segue o padrão da segunda rodada, mantendo a época em que ocorrem as cheias e estiagens e a duração delas, porém atenuando as magnitudes das cheias e evitando secas extremas, sem estabilizar o nível fluviométrico.

Apenas nos casos Q90, 1.300 m<sup>3</sup>/s, Q80, Q70 a demanda ambiental no baixo trecho do rio São Francisco foi atendida totalmente. Nos demais casos as vazões fornecidas para suprir a demanda ambiental foram abaixo do necessário em alguns meses, mesmo sendo atribuída prioridade máxima de atendimento. Como é esperado, quanto menor a permanência da vazão, representada pelas maiores vazões, é mais difícil manter o atendimento sem falhas (Quadro 8).

Quadro 8: Frequencia com que ocorrem vazões abaixo da demanda ambiental necessária – 3<sup>a</sup> Rodada.

<b>Casos</b>	<b>Frequência abaixo da demanda ambiental necessária (%)</b>
<b>Restrição 1.300m<sup>3</sup>/s</b>	0
<b>RDV Q10t</b>	92,59
<b>RDV Q20t</b>	80,32
<b>RDV Q30t</b>	61,92
<b>RDV Q40t</b>	40,16
<b>RDV Q50t</b>	19,91
<b>RDV Q60t</b>	2,55
<b>RDV Q70t</b>	0
<b>RDV Q80t</b>	0
<b>RDV Q90t</b>	0

Verifica-se que com o aumento da permanência do regime dinâmico de vazão houve menor perda energética nas usinas hidrelétricas, que variou de 32,7 a 99,7%, correspondendo aos RDV Q90t e Q10t, respectivamente (Quadro 9).

Quadro 9: Potência perdida (%) em relação ao caso sem restrição por situação simulada – 3ª Rodada

RDV Q90t	Restrição 1300m <sup>3</sup> /s	RDV Q80t	RDV Q70t	RDV Q60t	RDV Q50t	RDV Q40t	RDV Q30t	RDV Q20t	RDV Q10t
32,7	30,1	43,8	62,8	81,9	95,1	98,6	99,2	99,6	99,7

De acordo com o resultado das três rodadas de simulação nota-se que o caso em que se adotou o regime dinâmico de vazão com permanência mensal de 90% apresentou maior geração de energia na série histórica do que o caso em que se adotou a restrição de 1.300 m<sup>3</sup>/s mensal em todo o período, restrição atual a jusante dos reservatórios.

O caso que utiliza a vazão de restrição de 1.300 m<sup>3</sup>/s apresentou melhor resultado em perda de potência do que o caso que melhor favorece a geração de energia da 3ª rodada de simulação (Q90), produzindo um impacto de 30,1% em 72 anos de operação, de acordo com a simulação realizada.

Na 2ª rodada de simulação, a partir do caso Q40, em direção ao aumento da permanência, as demandas ambientais apresentaram menos falhas do que na 1ª rodada de simulação e um caso a mais de demanda ambiental (Q70, Q80 e Q90) atendida totalmente. No caso Q60, a diferença alcança 12,07% entre a 1ª e 2ª rodada (Quadro 10).

Quadro 10: Frequencia com que ocorrem vazões abaixo da demanda ambiental necessária.

Casos	1ª Rodada de Simulação	2ª Rodada de Simulação	3ª Rodada de Simulação
<b>Restrição 1.300 m<sup>3</sup>/s</b>	0	0	0
<b>RDV Q10</b>	87,85	92,59	92,59
<b>RDV Q20</b>	75,23	81,13	80,32
<b>RDV Q30</b>	62,38	62,38	61,92
<b>RDV Q40</b>	47,57	40,63	40,16
<b>RDV Q50</b>	32,87	17,25	19,91
<b>RDV Q60</b>	13,31	1,74	2,55
<b>RDV Q70</b>	5,44	0	0
<b>RDV Q80</b>	0	0	0
<b>RDV Q90</b>	0	0	0

Em relação à potência gerada, os casos de RDV simulados na 1ª rodada apresentaram menos potência perdida do que na 2ª e 3ª rodadas. A 1ª rodada apresentou melhores resultados para a geração de energia, mas não atendeu satisfatoriamente as demandas ambientais, havendo apenas dois casos com total atendimento (Q80 e Q90) e três casos com mais falhas do que na 2ª e na 3ª rodada (Q40, Q50 e Q60).

A adoção de RDV por condição hídrica interferiu com menos favorecimento para a geração de energia elétrica devido aos anos com condição hídrica ‘úmida’ e ‘muito úmida’, que elevaram os valores da demanda ambiental no baixo curso do rio. Porém, ao fazer as simulações adotando as necessidades ambientais sem considerar que existam diferenças interanuais, os valores das vazões dos regimes dinâmicos se apresentam similares as condições hídricas ‘seca’ e ‘média’ da 2ª rodada, em qualquer ano, não condizendo com a situação real.

Marques *et al* (2003), analisaram a influência dos diversos métodos de determinação da vazão ecológica no custo da energia gerada em uma usina hidrelétrica. O método da curva de permanência mensal apresentou maiores vantagens ambientais, porém menos viabilidade econômica, em relação aos métodos que não expressam a sazonalidade do comportamento fluvial. Essa constatação se repete nos resultados desta simulação, quando houve menos perda de potência gerada (30,1%) no caso com demanda ambiental igual a 1.300 m<sup>3</sup>/s do que nos casos de RDV da terceira rodada, em que a demanda ambiental tem variação mensal.

A adoção de regimes dinâmicos de vazão com o propósito de preservação ambiental não significa que as vazões devam ter grandes magnitudes. Os meses da estação menos chuvosa na demanda ambiental do estudo de caso, apresentou valores abaixo de 1.300 m<sup>3</sup>/s, que é a vazão de restrição mínima no baixo trecho do rio São Francisco. O mais importante é a aplicação de uma metodologia adequada aos aspectos ambientais da região e a representação da sazonalidade natural do regime fluvial.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho insere-se na temática de estudos destinados à determinação de regimes de vazões ecológicas em rios alterados por barramentos. A metodologia aplicada permite a escolha de diferentes critérios para a adoção de um regime dinâmico de vazões e para a simulação de diversos cenários de restrições à jusante de reservatórios.

Atualmente, no baixo curso é concebida uma vazão mínima de 1.300 m<sup>3</sup>/s para atender os múltiplos usos, inclusive as demandas ambientais. Os modelos de funcionamento de ambientes fluviais relacionam as complexas interações ecológicas e a biodiversidade com as diversas variáveis abióticas (fluxo de sedimentos, nutrientes, velocidade da corrente, substrato do leito etc.) que estão ligadas ao regime hidrológico de um rio. Tais estudos ecológicos são contrários à prática de adotar vazões, sem sazonalidade, a jusante de represamentos, transformando completamente a dinâmica do sistema fluvial.

Diversos métodos para determinação de vazões ecológicas podem ser aplicados no baixo curso do rio São Francisco para minimizar o processo de degradação do ambiente. Cada método tem uma exigência de detalhamento das informações, porém o mais eficiente não é o mais

complexo. Métodos simples utilizados em uma metodologia com visão holística e considerando a sazonalidade das vazões podem ser muito adequados para o rio São Francisco.

A identificação dos padrões hidrológicos semelhantes aos que ocorriam antes de 1955 permitiu propor regimes dinâmicos de vazão, considerando a sazonalidade natural e supondo que estes permitem a inundação de lagoas adjacentes ao rio, trazendo benefícios ecológicos. A determinação dos regimes dinâmicos de vazão no baixo trecho do rio São Francisco a partir da curva de permanência mensal fornece subsídios ao estudo de vazões ecológicas, porém isoladamente não cumpre com o papel de preservação ambiental.

O regime dinâmico de vazão a ser adotado depende da avaliação conjunta da situação ambiental desejada, das condições operacionais das UHE e da busca da minimização dos conflitos do uso da água no baixo trecho do rio São Francisco, culminando na elaboração de uma proposta sócio-econômica e ambiental que aponte metas e custos da implementação, a partir das análises de perdas e ganhos entre múltiplos usos e simulações com diversos cenários e diferentes demandas ambientais.

Na 1ª rodada de simulação, o cenário com a restrição mínima no baixo curso do rio São Francisco igual a 1.300 m<sup>3</sup>/s apresentou maiores perdas de potência no sistema do que o caso que utilizou o regime dinâmico de vazão Q90. Além disso, o RDV Q90 atendeu totalmente a demanda ambiental do cenário simulado com menor perda de potência.

A 2ª rodada de simulação apresentou maiores perdas de energia do que a 1ª rodada. Nessa simulação o caso que utiliza o RDV Q90 também apresentou maiores vantagens em relação a perdas de potência.

Na 3ª rodada, levando em consideração as restrições mínimas de vazão do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica (1.300 m<sup>3</sup>/s) e da Curva Bianaual de Aversão a Risco para a Região Nordeste (1.100 m<sup>3</sup>/s) e a vazão máxima do Plano Anual de Prevenção de Cheias do Rio São Francisco (8.000 m<sup>3</sup>/s), o resultado se inverteu. O caso Q90 superou o caso 1.300m<sup>3</sup>/s em perdas de energia, em uma diferença de 2,6%.

De acordo com a simulação neste trabalho, os melhores resultados em 72 anos de operação foi o seguinte:

- ✓ 1ª Rodada (sem considerar CHID): Q90 ⇒ perda de 18,2% do potencial a ser gerado;
- ✓ 2ª Rodada (considerando a CHID): Q90 ⇒ perda de 20,1% do potencial a ser gerado;
- ✓ 3ª Rodada (considerando a CHID e truncando a vazão mínima): Q90 ⇒ perda de 32,7% do potencial a ser gerado.

A 1ª rodada que não contempla variações climáticas interanuais, parece ser a melhor opção por gerar mais energia durante o período da simulação. Porém não representa a realidade

hidrológica, pois além de permitir vazões abaixo da vazão mínima concebida atualmente, não contempla vazões maiores que 2.599m<sup>3</sup>/s, o que pode comprometer a conexão de lagoas marginais no baixo trecho do rio São Francisco. Existem diferenças de condições hídricas em cada ano e adotar uma média pode acarretar impactos ambientais para espécies que se utilizam das variações fluviais para sobreviver.

A 2<sup>a</sup> rodada, apesar de suprir as demandas ambientais propostas, os RDV utilizados apresentam vazões muito extremas, maiores que 8.000 m<sup>3</sup>/s e menores que 1.100 m<sup>3</sup>/s. Essas são condições naturais do rio, mas devido aos usos do rio São Francisco e a ocupação das áreas no entorno hoje praticadas, essas vazões não seriam aceitas pela sociedade por gerar conflitos de uso e usuários.

Os RDVs utilizados para a 3<sup>a</sup> rodada de simulação atendem a demanda ambiental proposta considerando as vazões mínimas adotadas atualmente (1.300 e 1.100 m<sup>3</sup>/s) para contemplar os múltiplos usos do rio São Francisco e considerando também as vazões máximas permitidas para proteger cidades ribeirinhas de inundações (8.000 m<sup>3</sup>/s).

A adoção de RDVs que consideram maiores descargas, por impactarem a produção de energia mais fortemente, deveriam ser objeto de discussão pela sociedade, além de contemplar outros usos não explicitamente considerados neste estudo. A consideração das vazões ecológicas nos usos múltiplos das águas é fundamental para conciliar a saúde dos ecossistemas aquáticos com as necessidades humanas. Este artigo visa ser uma contribuição inicial para esse caminho.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pelo apoio por meio de bolsa de mestrado.

## **BIBLIOGRAFIA**

ANA/GEF/PNUMA/OEA (2003). *Subprojeto 2.4 – Estudo do Processo Erosivo das Margens do Baixo São Francisco e seus Efeitos na Dinâmica de Sedimentação do Rio*. Resumo Executivo do Relatório Final. Projeto Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. Aracaju.

ANA/GEF/PNUMA/OEA (2004). *Plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco – (2004-2013)*. Módulo 1. Resumo Executivo. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco - Subprojeto 4.5C. Salvador.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; OMM, Organização Meteorológica Mundial (2004) *Previsão de vazões na bacia do rio São Francisco com base na previsão climática*.

- BIZERRIL, C.R.S.F.; PRIMO, P.B.S. (2001) *Peixes de águas interiores do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: FEMAR – SEMADS.
- COLLISCHONN, W. *et al.* (2005) Em busca do hidrograma ecológico. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16, 2005, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.
- CRUZ, J. C. (2001). *Disponibilidade Hídrica para Outorga: Avaliação de aspectos Práticos e Conceituais*. 2001. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- FARIA, A. S. (2003) *Alocação ótima dos recursos hídricos através da aplicação de um modelo de rede de fluxo*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- GENZ, F.; LUZ, L.(2007) *Metodologia para considerar a variabilidade hidrológica na definição do regime natural de vazões no baixo curso do rio São Francisco*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo/SP.
- HENRY, R. (editor) (1999). *Ecologia de Reservatórios: Estrutura, Função e Aspectos Sociais*. Botucatu: Fundibio; Fapesp.
- LABADIE, J. W. (1988). Program MODSIM, river basin network flow model for the microcomputer. Department of Civil Engineering. Colorado State University, Fort Collins, Co.
- LERNER, G.L.S. (2006) *Estudo de impactos na geração hidroelétrica ao longo do rio São Francisco devido à transposição de suas águas utilizando modelo matemático de fluxos em rede Acquonet*. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- LUZ, L. D.; AMORIM, F. B.; LUZ, J. A. G. (2005). Aspectos ecológicos associados a alterações hidrológicas observadas no baixo trecho do rio São Francisco. In: Congresso de Ecologia do Brasil, 7., 2005, Caxambu, MG. Sociedade de Ecologia do Brasil.
- MARQUES, M.G. *et al.*(2003). Influência dos métodos de determinação de vazão ecológica no custo de geração de energia em aproveitamentos hidrelétricos-estudo de caso. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Curitiba, PR, 2003.
- O'KEEFFE, J. (2006). *What are environmental flows? background and rationale*. Delft, The Netherlands. Disponível em: <ftp://ftp.ihe.nl/Jay/>. Acesso em: 17 mai. 2006.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Plano Anual de Prevenção de Cheias - ciclo 2006/2007*. Rio de Janeiro, 2006.
- POFF, N. L. *et al.*(1997). The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, v.47, p.769-784, 1997.

RICHTER, B. D. *et al.*(2003) Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity. *Ecological Applications*, v. 13 n.1, p.206-224, 2003.

ROBERTO, A. N.(2002). *Modelos de Rede de Fluxo para Alocação de Água entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica*, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós Graduação em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.