



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS



**GEF**  
Fundo para o  
Meio Ambiente Mundial



**PNUMA**  
Programa das Nações Unidas  
para o Meio Ambiente



**OEA**  
Organização dos  
Estados Americanos

# **PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA NA BACIA DO SÃO FRANCISCO ANA/GEF/PNUMA/OEA**

## **Subprojeto 4.4 – Determinação de Subsídios para Procedimentos Operacionais dos Principais Reservatórios da Bacia do São Francisco**



### **Resumo Executivo do Relatório Final**

## **DETERMINAÇÃO DE SUBSÍDIOS PARA PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DOS PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO**



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

São Paulo - SP

**PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS  
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA  
NA BACIA DO SÃO FRANCISCO  
ANA/GEF/PNUMA/OEA**

**Subprojeto 4.4 – Determinação de Subsídios para Procedimentos  
Operacionais dos Principais Reservatórios da Bacia do São Francisco**

**Resumo Executivo do Relatório Final**

**DETERMINAÇÃO DE SUBSÍDIOS PARA  
PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DOS PRINCIPAIS  
RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

**Coordenação do Subprojeto**

Marcos Airtton de Sousa Freitas  
Agência Nacional de Águas

**Consultores Participantes**

João Eduardo Gonçalves Lopes  
Mario Thadeu Leme de Barros  
João Luiz Boccia Brandão

**Contrato CPR/OEA nº 31631 L1**

**Novembro de 2002**

# RESUMO EXECUTIVO

## INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar alternativas de modelação operacional dos reservatórios do rio São Francisco, considerando usos múltiplos para os seus recursos hídricos, no âmbito do Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do Rio São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA).

Estrategicamente ele fornece subsídios ao Comitê da Bacia na alocação de água aos diversos usos, estabelecendo com isso uma nova abordagem de gestão integrada dos recursos hídricos, contribuindo tanto para o desenvolvimento sustentável da bacia do rio São Francisco como da região Nordeste, em geral.

O aproveitamento dos reservatórios existentes na bacia do São Francisco, voltado ao uso múltiplo, acarretará ganhos aos usuários da água na região. A otimização econômica e a exploração sustentável dos recursos hídricos aumentarão os benefícios ao conjunto de usuários da água, possibilitando a gestão integrada da Bacia.

Sobradinho e Três Marias são os dois reservatórios de grande capacidade de acumulação e com regularização plurianual. Os demais reservatórios da Bacia são de menor capacidade, todos com ciclo de operação anual ou a fio d'água. Esses aproveitamentos exercem pouco controle na operação de múltiplo uso da água.

Os objetivos específicos do estudo são:

- detalhar a metodologia implementada nos modelos do ONS para planejamento da operação a médio prazo do subsistema Nordeste e verificar a possibilidade de incorporação dos usos múltiplos nesses modelos, assim como testar a utilização de outros modelos na simulação hidroenergética na bacia do rio São Francisco (capítulos 3 e 4);
- estimar a perda de energia decorrente da captação de águas em cada trecho do rio, para usos consuntivos e não consuntivos, envolvendo diversos cenários (capítulo 5.3), e
- avaliar as alternativas de substituição das perdas de energia devido ao uso múltiplo (capítulo 5.1).

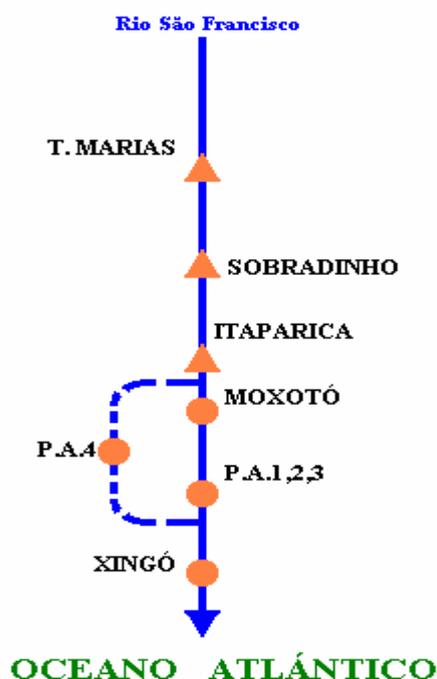
## 1. PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO E DADOS BÁSICOS

A bacia do rio São Francisco, com cerca de 640.000 km<sup>2</sup>, possui seis reservatórios para fins de produção de energia, cujas informações básicas são mostradas no Quadro 1.

**Quadro 1 - Reservatórios Hidrelétricos da Bacia do Rio São Francisco**

Aproveitamento	Empresa	Dist. até a foz (km)	Dist. entre Usinas (km)	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Á. drenagem incremental (km <sup>2</sup> )	Volume Útil (hm <sup>3</sup> )	Potência Instalada (MW)
TRÊS MARIAS	CEMIG	2220		50560	50560	15278	396
SOBRADINHO	CHESF	800	1420	498425	447865	28669	1050
ITAPARICA	CHESF	310	490	587000	88575	3548	1500
MOXOTÓ	CHESF	270	40	599200	12200	226	400
P.AFONSO1/3	CHESF	270	0	599200	0	90	1423
P.AFONSO4	CHESF	270	0	599200	0	30	2460
XINGÓ	CHESF	210	60	608700	9500	5	3000

Desses reservatórios, dois são de grande capacidade de acumulação, a saber, Três Marias e Sobradinho. Esses dois reservatórios apresentam uma capacidade de regularização plurianual, isto é, possuem ciclos de enchimento e esvaziamento superiores a um ano. Esses reservatórios foram construídos com finalidade principal de produção de energia elétrica, mas, devido a sua importância estratégica na regularização do Rio, podem considerar outros usos para a água nos seus procedimentos operativos. A Figura 1 apresenta o esquema topológico desse sistema.



**Figura 1 – Esquema da Bacia do Rio São Francisco**

O relatório ONS RE 3/199/2001, “Vazões Médias Mensais nos Aproveitamentos Hidrelétricos – Períodos 1931 a 1998” de outubro de 2001, apresenta as séries de vazões incrementais naturais utilizadas no planejamento energético. Essas séries incrementais representam a contribuição da área de drenagem intermediária entre uma usina e a usina localizada imediatamente a montante.

O Quadro 2 apresenta, para cada mês do ano, os valores médio dessas séries incrementais, para as usinas do São Francisco

**Quadro 2 - Vazões Incrementais Médias Mensais no Período 1931 a 1998  
(m3/s)**

	Três Marias *	Sobradinho	Itaparica	Paulo Afonso/Moxotó	Xingó
Jan	1535	3288	42	0	10
Fev	1435	3684	81	0	10
Mar	1160	3789	195	0	10
Abr	784	3128	156	0	10
Mai	480	1951	42	0	10
Jun	361	1312	7	0	10
Jul	288	1089	2	0	10
Ago	234	944	1	0	10
Set	219	822	1	0	10
Out	290	875	1	0	10
Nov	582	1317	4	0	10
Dez	1100	2338	31	0	10
média	706	2045	47	0	10
específica (l/s/km2)	14,0	4,6	0,5	0	1,1
MLT Natural	706	2750	2797	2797	2807

(\*) Não é incremental, pois é o reservatório situado mais a montante

Destacam-se algumas incoerências nas séries das vazões incrementais. Entre o complexo Paulo Afonso/Moxotó e Itaparica, a vazões são nulas em todo o período, apesar de possuir uma área de drenagem de 12200 km<sup>2</sup>. As vazões incrementais de Xingó são constantes em todo o período, com valor igual 10 m<sup>3</sup>/s para uma área de drenagem de 9500 km<sup>2</sup>

O relatório ONS RE 3/159/2001, “Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas”, de 1 de agosto de 2001, apresenta os estudos para cálculo da evaporação a ser utilizada no planejamento energético.

Os valores de evaporação líquida recomendados são apresentados no Quadro 3 e podem ser comparados aos valores em uso nos últimos anos obtidos nos cadastros da Eletrobrás, também tabelados no Quadro 4.

**Quadro 3 - Evaporação Líquida (mm/mês) SisEvapo - Normais 61-90**

	Três Marias	Sobradinho	Itaparica	Paulo Afonso/Moxotó	Xingó
Jan	3	41	39	38	32
Fev	0	29	30	35	26
Mar	27	23	25	37	22
Abr	47	36	24	51	22
Mai	63	48	32	61	30
Jun	64	58	39	64	36
Jul	60	56	44	48	38
Ago	54	47	48	22	40
Set	55	51	50	17	39
Out	42	46	47	9	37
Nov	24	47	46	17	34
Dez	24	56	44	40	34
TOTAL	463	538	468	439	390

**Quadro 4 - Evaporação líquida (mm/mês)**  
**SIPOT**

	<b>Três Marias</b>	<b>Sobradinho</b>	<b>Itaparica</b>	<b>Paulo Afonso/ Moxotó</b>	<b>Xingó</b>
Jan	2	118	140	140	140
Fev	0	106	109	109	109
Mar	22	81	81	81	81
Abr	40	132	105	105	105
Mai	51	153	109	109	109
Jun	55	142	101	101	101
Jul	50	158	123	123	123
Ago	42	181	158	158	158
Set	57	197	180	180	180
Out	48	189	195	195	195
Nov	23	114	158	158	158
Dez	29	98	152	152	152
<b>TOTAL</b>	<b>419</b>	<b>1669</b>	<b>1611</b>	<b>1611</b>	<b>1611</b>

Com exceção de Três Marias, nota-se grande diferença nos valores de evaporação dos demais reservatórios. Parece haver inconsistências na obtenção dos dados do Quadro 3, já que nos reservatórios da região semi-árida a evaporação líquida é menor que na região sudeste. O Quadro 3 apresenta valores aparentemente baixos, 1/3 dos utilizados até então (Quadro 4).

## **2. USO MÚLTIPLO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

Foram coletados dados dos diversos usos da água não consuntivos e consuntivos:

### **Usos não consuntivos:**

- **Geração de Energia** – Dados físicos das Usinas
- **Controle de Cheias** - Vazões máximas que causam danos severos de inundação a jusante da usina.
- **Navegação** - Vazões mínimas necessárias para manter o calado de navegação nos trechos de rio navegáveis.

### **Usos consuntivos:**

- **Irrigação** - Demandas de Irrigação e Estudos de Transposição baseadas em trabalhos executados pelas diversas Instituições atuantes na bacia.

Existem outros usos ainda sem informações suficientes para serem considerados na operação dos reservatórios: abastecimento, lazer e turismo, necessidades para diluição de poluentes, necessidade relativas a atividades pesqueiras, etc.

A utilização de um reservatório de usina hidrelétrica para fins múltiplos pode afetar a operação do mesmo e, conseqüentemente, sua energia e potência asseguradas, através da imposição de restrições aos níveis de água máximo e mínimo, afetando, com isso, a potência capaz de ser gerada, o rendimento das unidades geradoras e o volume útil do reservatório disponível para o armazenamento de água a ser turbinada nos momentos mais apropriados, e restrições quanto à vazão vertida máxima, ou vazão defluente mínima.

A retirada de água para outros usos pode diminuir, também, a vazão afluyente aos reservatórios hidrelétricos reduzindo a energia assegurada pelos mesmos. A necessidade de manutenção de uma vazão remanescente no trecho do rio entre a barragem e a restituição, no caso das usinas em que a casa de força não se localiza junto à barragem, também provoca uma redução na vazão turbinada.

Consoante a lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, a gestão da água dos reservatórios deve sempre priorizar os usos múltiplos. Dessa forma, sendo a energia hidrelétrica um dos usos da água, deve-se otimizá-la em conjunto com outros, tais como, irrigação, navegação, controle de cheias, lazer e turismo, qualidade da água e preservação da flora e fauna aquáticas.

O relatório ONS RE 3/092/2001 - 2ª revisão de 07 de agosto de 2001 apresenta o “INVENTÁRIO DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS HIDRÁULICAS DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS”. O Quadro 5 apresenta um resumo das restrições relativas à Bacia do São Francisco.

**Quadro 5 - Resumo das Restrições Hidráulicas Existentes na Bacia**

Empresa	Aproveitamento	Vazão Mínima (m <sup>3</sup> /s)	Taxa de variação da defluencia (m <sup>3</sup> /s/dia)	Restrições Operativas	
				MONT (m)	JUS (m <sup>3</sup> /s)
CEMIG	TRÊS MARIAS	500	400 a 700	-	2500
CHESF	SOBRADINHO	1300	1000	-	8000
CHESF	ITAPARICA	1300	-	NAmáx =304,00 m	8000
CHESF	MOXOTÓ	-	-	-	8000
CHESF	P.AFONSO1/3	-	-	-	8000
CHESF	P.AFONSO4	-	-	-	8000
CHESF	XINGÓ	1300	-	-	-

O “PLANO ANUAL DE PREVENÇÃO DE CHEIAS CICLO 2000/2001”, elaborado pelo ONS, apresenta os estudos realizados para todo o sistema hidroenergético brasileiro. Segundo esse documento, o controle de cheias na Bacia do São Francisco é feito por meio da operação dos reservatórios de Três Marias, Sobradinho e Itaparica, onde são alocados volumes de espera.

Recentemente a ANA, em atendimento às solicitações do Setor Elétrico, quanto aos valores de demandas atuais e futuras para irrigação na bacia do rio São Francisco, emitiu a Resolução 145 de 22 de julho de 2002. As estimativas de áreas irrigadas e as respectivas demandas publicadas nessa resolução estão reproduzidas nos Quadros 6 e 7.

**Quadro 6 - Estimativa da área irrigada na bacia do rio São Francisco (em hectare)**

Ano	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Montante de Sobradinho	162407	166305	170203	174101	177999	181897	185795	189693	193591
Entre Sobradinho e Itaparica	149619	153210	156801	160392	163983	167575	171166	174757	178348
Entre Itaparica e Xingó	6885	7050	7216	7381	7546	7711	7877	8042	8207
Jusante de Xingó	14399	14745	15090	15436	15781	16127	16473	16818	17164
<b>TOTAL</b>	<b>333310</b>	<b>341310</b>	<b>349310</b>	<b>357310</b>	<b>365310</b>	<b>373310</b>	<b>381310</b>	<b>389310</b>	<b>397310</b>

A área irrigada na Bacia foi estimada com base em levantamento feito pela CODEVASF. Considerou-se uma taxa de crescimento de 8.000 ha/ano, mantendo a mesma proporcionalidade.

Para estimativa da vazão empregou-se uma vazão específica de retirada média de 0,58 l/s/ha.

**Quadro 7 - Estimativa da vazão média anual retirada para irrigação na bacia do rio São Francisco (em m<sup>3</sup>/s)**

Ano	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Montante de Sobradinho	94,2	96,5	98,7	101,0	103,2	105,5	107,8	110,0	112,3
Entre Sobradinho e Itaparica	86,8	88,9	90,9	93,0	95,1	97,2	99,3	101,4	103,4
Entre Itaparica e Xingó	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
Jusante de Xingó	8,4	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,8	10,0
<b>TOTAL</b>	<b>193,3</b>	<b>198,0</b>	<b>202,6</b>	<b>207,2</b>	<b>211,9</b>	<b>216,5</b>	<b>221,2</b>	<b>225,8</b>	<b>230,4</b>

Com base no fator de sazonalidade médio, para as demandas na bacia do rio São Francisco, fornecidos pela ANA e mostrados no Quadro 8, podem ser estimadas as vazões médias mensais retiradas para a irrigação.

**Quadro 8 - Fator de sazonalidade médio (ANA) para as demandas na bacia do rio São Francisco**

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1,144	0,877	0,839	0,815	0,912	0,839	0,884	1,001	1,113	1,286	1,189	1,101

### 3. DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DOS MODELOS DO ONS

Atualmente a operação do sistema brasileiro de geração de eletricidade é feita pelo ONS - Operador Nacional do Sistema. Pela regulamentação existente, as empresas proprietárias dos reservatórios devem acatar as decisões do ONS quanto às descargas a serem efetuadas.

Por sua vez o ONS tem uma missão claramente definida e deve homologar seus procedimentos na ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. O objetivo do ONS é minimizar o custo de operação de todo o sistema interligado brasileiro, com certa garantia de atendimento da demanda de energia.

Como a energia hidrelétrica é apenas um dos usos da água, a operação deve ser otimizada em conjunto com outros usos, como: Irrigação, Navegação, Controle de Cheias, Lazer e Turismo, e em harmonia com a preservação da Qualidade da Água e do Meio Ambiente.

O ONS utiliza uma cadeia de modelos e programas computacionais para definir as regras de operação do Sistema Interligado Nacional, do qual as usinas do rio São Francisco fazem parte. Dentre os principais modelos que definem as políticas de operação, dois têm papel primordial:

**NEWAVE** - Otimiza a operação do sistema brasileiro considerando quatro sub-sistemas equivalentes. Tem horizonte de 5 anos a frente em intervalo mensal. Utiliza programação dinâmica dual estocástica para decisões de geração térmica, avaliação da garantia de atendimento da demanda e cálculo do valor energético da água. O seu produto principal são as curvas de valor futuro da água, empregadas pelo DECOMP para discretizar as energias produzidas por cada reservatório do sistema.

**DECOMP** - Otimiza o sistema a usinas individualizadas com horizonte de um ano definindo a operação em intervalo semanal para elaboração do programa mensal de operação (PMO). As curvas de valor futuro da água, calculadas pelo NEWAVE são utilizadas pelo DECOMP para definir a regra ótima para cada reservatório do sistema.

O NEWAVE emprega a técnica de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), que evita os problemas de dimensionalidade associados à discretização do espaço de estados, viabilizando a obtenção da estratégia ótima de operação para sistemas hidrotérmicos interligados. Esta técnica

de resolução traz como principais benefícios a representação explícita dos intercâmbios entre os subsistemas e a utilização de um modelo de energias afluentes auto-regressivo mensal de ordem  $p$ , o qual pode ser utilizado tanto na etapa de cálculo da estratégia quanto na etapa de simulação da operação. Uma desvantagem desta técnica é que, em função do tamanho do sistema, os reservatórios de cada sub-sistema precisam ser agrupados numa única usina equivalente.

O sistema de geração hidroelétrico é representado através do modelo equivalente de energia. Neste modelo, o parque gerador hidroelétrico de cada região é representado por um reservatório equivalente de energia, cujos principais parâmetros são as variáveis que compõem o balanço de massa nos reservatórios, como as afluências naturais, os vertimentos controláveis ou não, os armazenamentos máximos e mínimos, as perdas por evaporação, as vazões mínimas e os desvios de água para outros usos.

A questão dos usos múltiplos da água é levada em conta através das restrições de vazões mínimas e pelos desvios para atendimento de demandas consuntivas. Nesse caso, esses elementos são levados em consideração na composição dos reservatórios equivalentes de cada subsistema e são encarados pelo modelo como perdas energéticas.

Os usos não consuntivos são bem representados pelas vazões mínimas e definições de níveis máximos e mínimos dos lagos. Em geral, a consideração desses tipos de restrições pode representar adequadamente usos associados com a navegação, lazer e turismo, garantia de qualidade da água, preservação ambiental e atividades de pesca.

De qualquer forma, deve-se ressaltar as falhas incontornáveis que ocorrem na representatividade de sistemas agregados. A distribuição irregular da chuva numa grande bacia, somada a diferenças na capacidade de regularização dos reservatórios em função de sua distribuição espacial, causa distorções nos cálculos.

Outro problema relacionado com a agregação é prejudicar análise de uso múltiplo da água. Uma vez que os usos da água são especificados por reservatório, o processo de agregação faz com que se perca a possibilidade de análise distribuída da operação com propósitos múltiplos. O NEWAVE pode agregar reservatórios para análise energética, mas não pode considerar a variabilidade espacial da demanda de outros usos na Bacia. Questões importantes como operação de reservatórios em períodos de estiagem, definindo prioridades para outros usos, que não geração de energia elétrica, ficam prejudicadas por este tipo de abordagem.

O modelo DECOMP (Determinação da Coordenação da Operação a Curto Prazo) é utilizado no planejamento da operação de curto prazo do sistema hidrotérmico de geração. Ele faz parte da cadeia de modelos utilizados no planejamento da operação do sistema de geração, e procura representar com mais detalhe os elementos desse sistema.

Dessa forma, o modelo tem como objetivo definir metas de geração para cada usina, de forma a atender a carga e minimizar o valor esperado do custo de operação do sistema ao longo do período de planejamento. Este custo é composto pelos gastos com combustível nas usinas térmicas, somados a eventuais penalidades associadas ao não atendimento da carga (custo do déficit) e ao vertimento em reservatórios. O horizonte de planejamento é de até um ano, discretizado em etapas mensais.

Os modelos NEWAVE e DECOMP, utilizados pelo ONS, consideram os usos múltiplos na forma de restrições operativas e desvios de água para fora dos sistemas modelados.

A consideração desses elementos na modelagem pode impactar a política de operação de reservatórios, uma vez que o aumento no número de restrições diminui o leque de possibilidades

operativas, graus de liberdade, gerando muitas situações em que não é possível obter soluções factíveis.

Em 2002, os impactos dessas retiradas e restrições não têm sido grandes no São Francisco. Contudo, com o crescimento da demanda, os conflitos tendem a crescer, exigindo-se que no futuro o processo de otimização dos sistemas hidrelétricos deixe de focar a questão dos usos múltiplos na forma de equações de restrição, e venha a incluir essa questão de outra forma, incorporando funções multi objetivo, que podem representar concomitantemente os benefícios decorrentes de diversos usos.

Desta análise, conclui-se que os modelos NEWAVE e DECOMP não atendem satisfatoriamente a operação de uso múltiplo. Devem ser feitas sérias restrições à abordagem conceitual do conjunto NEWAVE/DECOMP, uma vez que as regras obtidas são sempre ótimas do ponto de vista energético e obtidas segundo uma metodologia não apropriada para uso múltiplo. Como comentado anteriormente, o processo de agregação e posterior desagregação traz sérios problemas para determinação de regras para uso múltiplo. Questões importantes como operação com uso múltiplo com critérios de racionamento de água, regras para levar em conta a distribuição espacial e temporal de usos como a irrigação, etc. não podem ser tratadas adequadamente com esses modelos.

#### **4. METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS COM FINS MÚLTIPLOS**

Este capítulo trata da metodologia do modelo a ser empregado na operação dos reservatórios instalados na bacia do rio São Francisco. É feita uma abordagem geral da modelação matemática nesse campo, a seguir, são feitas algumas sugestões para tratamento do problema aqui focado, o sistema do rio São Francisco.

Como foi comentado no Capítulo anterior, os modelos em uso pelo ONS, principalmente as cadeias NEWAVE/DECOMP, possuem estrutura para computadores de grande porte. São modelos que tiveram origem há alguns anos, quando os softwares de programação não eram tão desenvolvidos como os ora existentes. Além disso, há alguns anos atrás, só os computadores de grande porte eram capazes de processar rotinas como as empregadas por esses modelos. Atualmente existem softwares e micro computadores para resolver os mesmos problemas, empregando a filosofia de trabalho dos DSS's (Decision Support System).

Destaca-se que o desenvolvimento da tecnologia de rotinas eficientes de otimização, em paralelo com o desenvolvimento vertiginoso da informática, colocando no mercado computadores portáteis de elevada capacidade de processamento e de armazenamento de dados, permitem que sejam desenvolvidos modelos mais eficientes e mais fáceis de serem processados, do que os modelos tradicionais, ainda em uso por diversas entidades que lidam com a operação de sistemas de recursos hídricos. Portanto, o desenvolvimento de novos modelos deve seguir esta linha de trabalho: modelos tão eficientes quanto os utilizados atualmente, como, por exemplo, pelo ONS, mas com a filosofia de praticidade e de eficiência para análise e processamento de dados.

No caso aqui em pauta, a operação dos reservatórios do rio São Francisco, pode ser tratada tanto por simulação, como por otimização. Diversos estudos foram feitos utilizando essas metodologias. Foge do escopo deste texto uma revisão bibliográfica nesta linha. Pretende-se discutir aqui de forma mais objetiva uma proposta metodológica de análise que considere a operação do sistema segundo o conceito de operação multiobjetivo, ou seja, de uso múltiplo da água

Considerando a questão da modelação segundo o enfoque descrito anteriormente, recomenda-se o emprego de um modelo de otimização para o São Francisco, no qual se pretende utilizar rotinas que empregam algoritmos colocados no mercado mais recentemente e que possuem elevado grau de precisão e de rapidez.

O problema de determinação da regra operativa de um sistema de reservatórios quando colocado no formato matemático de otimização deve ter as seguintes características:

**Função objetivo:** definição da função que maximiza ou minimiza determinados objetivos fixados pelo decisor; os objetivos são explicitados por uma função, que por sua vez está relacionada com as **variáveis de decisão**, em geral as vazões operadas pelos reservatórios. A definição dessas vazões estabelece a regra de operação.

**Equações de Restrição:** as variáveis envolvidas na otimização devem obedecer a uma série de equações de restrição, do tipo:

- Características físicas dos aproveitamentos;
- Características físicas das estruturas hidráulicas e mecânicas;
- Características operacionais;
- Equações de Balanço Hídrico nos aproveitamentos.

No caso do rio São Francisco estão envolvidas, basicamente, dois usos conflitantes, geração de energia e irrigação. As demandas de água para abastecimento doméstico e industrial podem ser agrupadas e serem retiradas do volume de irrigação ou da própria vazão afluyente aos aproveitamentos. Em todo caso, isso não é crítico. Portanto, o Método das Restrições é adequado para o São Francisco, considerando dois usos básicos: geração de energia e irrigação. As demandas de abastecimento podem ser agrupadas num volume, chamado de uso consuntivo, e inserido nas equações de balanço hídrico. Outra parcela de uso importante é a evaporação na bacia. Esta parcela deve ser considerada na equação de balanço. Outros usos como navegação, recreação, conservação, etc. não são conflitantes com a geração e com a irrigação no rio São Francisco, são usos que podem ser considerados nas equações de restrição.

Outra questão fundamental da otimização e o tipo de equações envolvidas, se lineares ou não. As otimizações lineares são mais fáceis de serem resolvidas, as não lineares são bem mais complexas. A otimização da operação de reservatórios envolve tanto equações lineares como não lineares, ou seja, é um problema que deve ser resolvido por métodos não lineares.

## **5. SUBSÍDIOS PARA PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DOS PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

Este capítulo consolida todos os pontos enfocados ao longo do texto.

Os testes de otimização do sistema utilizam dados de demandas e usos consuntivos que foram fornecidos pela ANA.

A metodologia descrita em 4 foi implantada num aplicativo desenvolvido com a planilha EXCEL (versão 97) com uso de macros em VBA e uso da ferramenta SOLVER.

O Quadro 9 apresenta os resultados do modelo para os três cenários, variando a demanda de irrigação como um fator da demanda do ano 2002. Não foi considerado retorno da água consumida por se tratar de região semi-árida.

## Quadro 9 – Resultados da otimização

Resultados da Otimização											
Irrigação		úmido			mediano			seco			
fator	m3/s	Geração Mwmédio	Vertimento Mwmédio/(m3/s)	Mwmédio	Geração Mwmédio	Vertimento Mwmédio/(m3/s)	Mwmédio	Geração Mwmédio	Vertimento Mwmédio/(m3/s)	Mwmédio	
0	0	7368		1217	6327		84	4669		0	
0,5	99,2	7269	-0,998	1072	6167	-1,613	0	4421	-2,500	0	
1	198	7172	-0,982	927	5921	-2,490	0	4173	-2,510	0	
1,5	297	7073	-1,000	782	5675	-2,485	0	3924	-2,515	0	
2	397	6975	-0,980	637	5429	-2,460	0	3676	-2,480	0	

Para o cenário seco não foi possível atender a vazão mínima de 500 m<sup>3</sup>/s em Três Marias para atender a navegação. O modelo de otimização não converge para uma solução factível. Desse modo, foi necessário reduzir esta restrição de 500 m<sup>3</sup>/s para 400 m<sup>3</sup>/s. Ressalta-se que esta vazão é insuficiente para atender a navegação no trecho a jusante de Três Marias.

Nesse mesmo cenário, e considerando um fator igual a dois para o uso consuntivo, não foi possível atender a vazão mínima de Xingó, 1300 m<sup>3</sup>/s (restrição de captação para abastecimento de água a jusante). Neste caso, a vazão foi reduzida para 1200 m<sup>3</sup>/s.

Em linhas gerais, os resultados do Quadro 16 mostram que, nos cenários mediano e seco, para cada 1 m<sup>3</sup>/s desviados para irrigação perde-se cerca de 2,5 MW-médios, enquanto que no cenário úmido essa perda de é aproximadamente 1 MW-médio.

Os resultados do Quadro 9 foram empregados para traçar as curvas de troca, apresentadas na Figura 2.

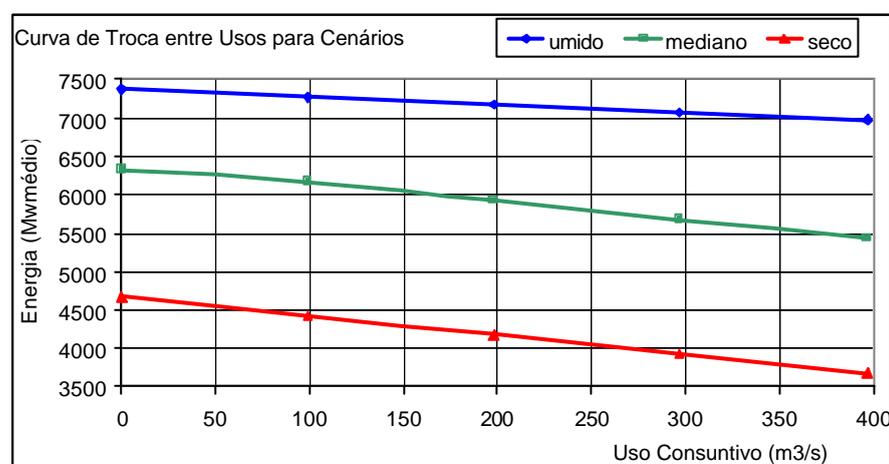


Figura 2 – Curvas de Troca entre Usos

Essas curvas possibilitam aos decisores avaliar o quanto se ganha ou quanto se perde de uso em relação a outro, conforme descrição metodológica apresentada em 4. Percebe-se que a geração de energia é sensível à demanda de irrigação. Ressalta-se que o ponto correspondente à vazão de 198 m<sup>3</sup>/s representa o consumo estimado para 2002. Observa-se também que a troca entre os usos é sensível aos cenários hidrológicos.

Foi feita também uma análise de sensibilidade preliminar para avaliar diferentes componentes do problema. O Quadro 10 apresenta um resumo dos casos analisados:

- **Caso 1:** situação real de 2002: são consideradas todas as restrições atuais, volumes de espera e restrições de vazões mínimas (apresentado em 2.2), além das demandas de uso

consuntivo (apresentado em 2.) e dados de evaporação em uso pelo ONS (apresentado em 1).

- **Caso 2:** não são consideradas as restrições de volume de espera e vazão mínima
- **Caso 3:** não são consideradas as restrições de vazão mínima
- **Caso 4:** não são consideradas as restrições de volumes de espera
- **Caso 5:** são utilizados os dados de evaporação reduzida fornecidos pelo SISEVAPO (apresentado em 1).
- **Caso 6:** despreza-se o efeito de evaporação nos reservatórios
- **Caso 7:** não são consideradas as restrições de usos consuntivos

Todos os casos foram analisados para os três cenários hidrológicos considerados, úmido, mediano e seco.

**Quadro 10 – Comparação de casos**

Casos	<i>úmido</i>		<i>mediano</i>		<i>seco</i>	
	Energia MWmed	Diferença MWmed	Energia MWmed	Diferença MWmed	Energia MWmed	Diferença MWmed
1	7172		5921		4173(*)	
2	7187	15	5929	8	4205	32
3	7172	0	5926	5	4188	15
4	7187	15	5924	3	4183(*)	10
5	7338	166	6269	348	4582	409
6	7426	254	6402	481	4809	636
7	7368	196	6327	406	4669	496

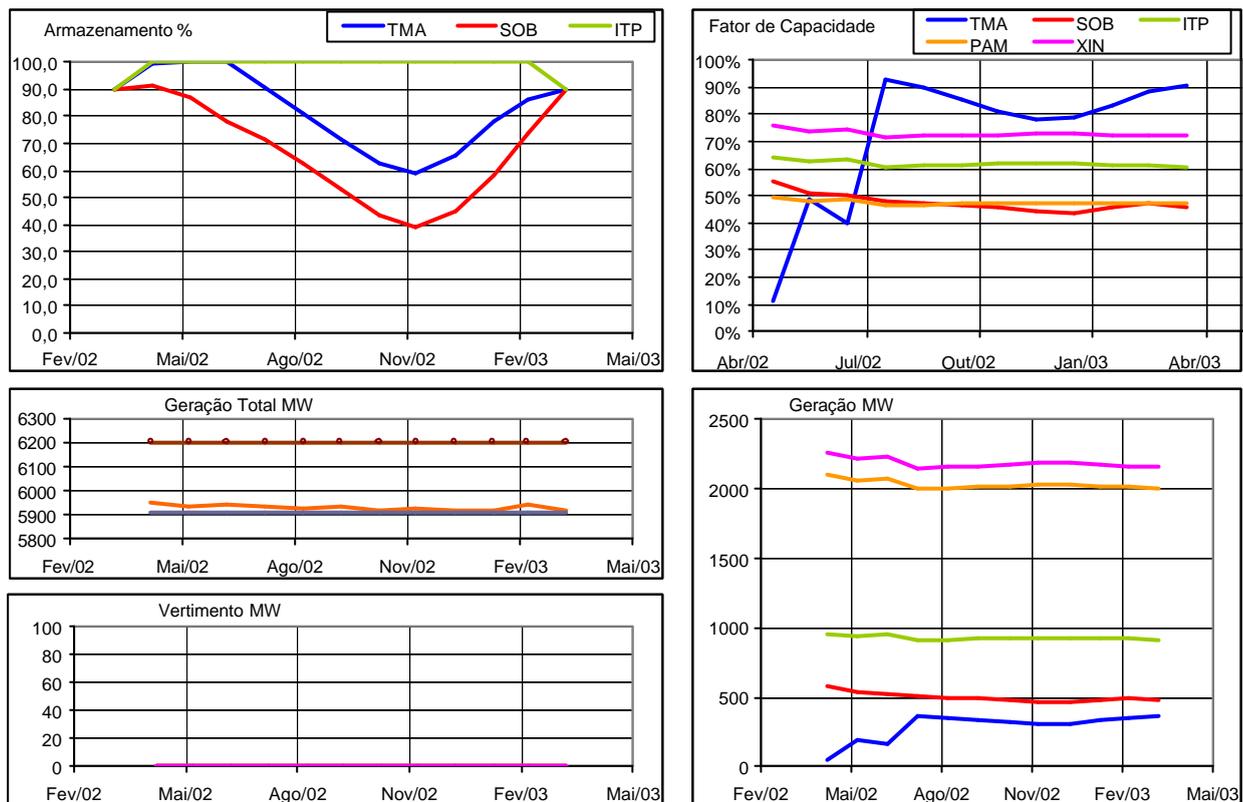
(\*) vazão mínima reduzida a 400 m<sup>3</sup>/s em Três Marias

Os resultados do Quadro 10 mostram os impactos das vazões mínimas, dos volumes de espera, da evaporação e do uso consuntivo sobre a geração média, para os três cenários hidrológicos considerados. Esses impactos são resumidos as seguir:

- **Vazão mínima:** a vazão mínima não causa impacto na geração quando se considera uma hidrologia úmida. No entanto, para as séries mediana e seca surgem pequenas diferenças, da ordem de 0,08% e 0,36% respectivamente. Cabe ressaltar que liberar a vazão mínima inviabiliza a navegação para os cenários mediano e seco e pode não atender usos consuntivos.
- **Volume de espera:** observam-se pequenas diferenças entre as produções energéticas: 0,21%, 0,05% e 0,24% para períodos úmidos, medianos e secos, respectivamente. Quando são eliminadas as restrições de vazão mínima e controle de cheias, observam-se, nos cenários úmido, mediano e seco, respectivamente, as seguintes diferenças: 0,21%, 0,14% e 0,77%. Pode-se concluir que essas duas restrições impactam muito pouco a produção de energia.
- **Evaporação:** o efeito da evaporação é bastante significativo na Bacia. Quando não são consideradas as perdas por evaporação, a produção de energia cresce muito para as três hidrologias. Para os cenários úmido, mediano e seco os percentuais alcançam 3,5%, 8,1% e 15%, respectivamente. Quando são consideradas as evaporações calculadas pelo modelo SISEVAPO, os percentuais atingem 2,3%, 5,9% e 9,8%, respectivamente. Verifica-se, portanto, que a substituição dos valores da evaporação, proposta pelo ONS, poderá elevar significativamente os valores da energia garantida dessas usinas.

- **Usos consuntivos** (irrigação): quando não se consideram os usos consuntivos, os percentuais de ganho energético são 2,7%, 6,9% e 12% para os cenários úmido, mediano e seco, respectivamente. São valores que podem ser comparados com o efeito da evaporação.

A título de ilustração, a seguir são mostrados alguns gráficos na Figura 3 com a variação de volumes dos aproveitamentos, a produção de energia por usina e total e o fator de capacidade por usina para o caso 2 (não são consideradas as restrições de volume de espera e vazão mínima) com cenário hidrológico mediano. O fator de capacidade é definido como a relação entre a energia média produzida no mês pela potência instalada da usina. É um parâmetro que permite identificar o nível de utilização da usina.



**Figura 3 – Caso 2: Sem restrições de Volume de Espera e de Vazão Mínima – Cenário Mediano**

O caso 2, apresentado acima, foi considerado para verificar o desempenho do sistema hidroelétrico sem restrições, mantendo as demandas de irrigação. Este caso reflete uma situação em que a geração não fica condicionada ao controle de cheias e à manutenção de vazões mínimas. As trajetórias de armazenamento indicam a melhor situação para uma política operacional voltada à produção de energia. Nota-se que o reservatório de Sobradinho permanece mais tempo mais baixo que os demais. Isso se deve, muito provavelmente, ao fato do otimizador procurar reduzir a área do lago para minimizar as perdas por evaporação. O reservatório de Itaparica, o mais a jusante, mantém-se praticamente cheio durante o período, enquanto que o reservatório de cabeceira, Três Marias, é utilizado menos em termos de porcentagem do armazenamento.

## 6. CONCLUSÕES

Ao longo deste estudo, diversos aspectos da operação dos reservatórios do Sistema São Francisco foram discutidos, tendo em vista a inclusão do uso múltiplo dos recursos hídricos nas regras operacionais atuais. As principais conclusões, derivadas das análises e apreciações elaboradas ao longo do estudo, são apresentadas a seguir:

- **USO MÚLTIPLO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

- O uso múltiplo da água no rio São Francisco caracteriza-se fundamentalmente em atender a produção de energia elétrica, a irrigação, a navegação e, em alguns trechos do rio, o controle de cheias.
- Entre esses usos, a produção de energia elétrica e a irrigação (e demais usos consuntivos) competem de forma mais intensa pelos hídricos da bacia. Essa questão deve trazer importantes desdobramentos para esses setores, uma vez que essa competição deve se intensificar no futuro. Recentemente, o Grupo de Trabalho para Avaliação da Metodologia de Cálculo da Energia Assegurada de Usinas Hidrelétricas propôs uma revisão da metodologia vigente. Na revisão metodológica devem ser definidos critérios de re-alocação da energia assegurada, eventualmente perdida em decorrência do uso múltiplo da água.
- Nesse contexto, é fundamental contar com avaliações precisas e robustas dessas demandas para irrigação e demais usos, pois esses dados irão subsidiar os estudos para estabelecimento da divisão equitativa dos recursos hídricos da bacia do São Francisco.
- Neste estudo, a inclusão da irrigação na operação foi considerada na equação de balanço hídrico dos reservatórios como uso consuntivo, com nenhum retorno de água para a própria bacia.
- Outra questão importante nessa bacia hidrográfica é a perda por evaporação nos lagos dos aproveitamentos. O clima da região caracteriza-se por ser extremamente seco, com elevados índices de evaporação. Em termos de operação dos reservatórios, essas perdas devem ser consideradas, uma vez que as regras são sensíveis a esses volumes perdidos.
- Deve-se ressaltar que, caso se considere na modelagem as taxas de evaporação recentemente revistas pelo Setor Elétrico, a geração no São Francisco, calculada a partir de ensaios preliminares, eleva-se em cerca de 300 MW-médios, o que corresponde a 5% da energia gerada.

- **DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DOS MODELOS DO ONS**

- Os modelos utilizados na operação do sistema hidroenergético da bacia do São Francisco estão integrados com o sistema brasileiro e são processados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os modelos analisados neste estudo foram o NEWAVE e o DECOMP, empregados no planejamento e programação do sistema elétrico brasileiro.
- O exame da documentação desses modelos indica que o uso múltiplo pode ser considerado por meio de equações de restrição. Esse tipo de abordagem é adequado para considerar esse tipo de problema. Todavia, a metodologia empregada nesses modelos, pode não ser adequada para tratar com eficiência o problema de uso múltiplo.

- O modelo NEWAVE emprega a técnica de agregação para tornar possível a otimização do sistema brasileiro de reservatórios com PD. Esta técnica transforma uma centena de aproveitamentos em apenas quatro subsistemas, o que gera perda de representatividade para o uso múltiplo. Os resultados do NEWAVE condicionam a operação do modelo DECOMP. O DECOMP é operado para alguns meses à frente, utilizando modelos de previsão de vazões, para definir regras operativas em cada reservatório do sistema. Uma vez que a questão de uso múltiplo está bastante associada à sazonalidade hidrológica, e que isso pode acarretar em problemas de longo prazo, com durações superiores a um ano, o DECOMP, da mesma forma que o NEWAVE, pode apresentar problemas no tratamento de operação com propósitos múltiplos. Portanto, apesar de considerar o uso múltiplo da água, o pacote NEWAVE/DECOMP apresenta limitações para o seu emprego nesse tipo de abordagem.
- Além disso, a cadeia NEWAVE/DECOMP, possui estrutura para computadores de grande porte. São modelos que tiveram origem há alguns anos, quando os softwares de programação não eram tão desenvolvidos como os ora existentes. Há alguns anos atrás, só os computadores de grande porte eram capazes de processar rotinas como as empregadas por esses modelos. Atualmente, existem softwares e microcomputadores para resolver os mesmos problemas, empregando a filosofia de trabalho dos DSS's (Decision Support Systems).
- **METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS COM FINS MÚLTIPLOS**
  - Destaca-se que o desenvolvimento da tecnologia de rotinas eficientes de otimização, em paralelo com o desenvolvimento vertiginoso da informática, colocando no mercado computadores portáteis de elevada capacidade de processamento e de armazenamento de dados, permitem que sejam desenvolvidos modelos mais eficientes e mais fáceis de serem processados, do que os modelos tradicionais, ainda em uso por diversas entidades que lidam com a operação de sistemas de recursos hídricos. Portanto, o desenvolvimento de novos modelos deve seguir esta linha de trabalho: modelos tão eficientes quanto os utilizados atualmente, como, por exemplo, pelo ONS, mas com a filosofia de praticidade e de eficiência para análise e processamento de dados.
  - Para caso do São Francisco, aconselha-se o emprego de um modelo de otimização, no qual se pretende utilizar rotinas que empregam algoritmos colocados no mercado mais recentemente e que possuem elevado grau de precisão e de rapidez. A forma de programar a otimização da operação permite que o modelo possa ser também empregado como simulador da operação.
  - Dessa forma, foi proposta neste estudo uma metodologia de análise e de determinação de regra operativa de reservatórios, que considera adequadamente os usos múltiplos da água num sistema hidroenergético. O método proposto consiste em otimizar o sistema com funções objetivo energéticas, considerando outros usos na forma de restrições, porém preservando a representação em reservatórios individualizados e tratando a operação numa escala de tempo adequada para os usos múltiplos. Com esse tipo de abordagem é possível estimar as curvas de troca entre os objetivos considerados conflitantes, essencialmente geração, irrigação e controle de cheias. Foi apresentada uma primeira versão do modelo, feita em planilha EXCEL e VB do Windows. Esta versão pode otimizar os três reservatórios de regularização do São Francisco em escala mensal, para doze meses.

## • **SUBSÍDIOS PARA PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DOS PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

- Processamentos preliminares demonstraram a viabilidade da técnica para abordagem do problema. Os resultados obtidos apontam para uma tendência de aumento na competitividade dos dois usos preponderantes na bacia, irrigação e energia. Esses resultados indicaram que, nos cenários de disponibilidade hídrica mediana e baixa, para cada 1 m<sup>3</sup>/s de água desviada para irrigação, perde-se cerca de 2,5 MW-médios, o que equivale aproximadamente a 22 GWh/ano.
- Com a crescente demanda por água de irrigação, a consideração do uso múltiplo na determinação das regras operacionais do sistema irá se tornar obrigatória. Os resultados operacionais preliminares obtidos neste estudo mostraram que a consideração adequada dos usos múltiplos pode afetar significativamente a operação de determinados reservatórios.
- Além disso, quando as taxas de evaporação são muito elevadas, como no caso da bacia do São Francisco, a técnica de otimização, incluída na metodologia empregada, pode alterar consideravelmente a forma de operação de determinados reservatórios, como por exemplo, o de Sobradinho.
- O aumento da capacidade da interligação elétrica da região Nordeste com as regiões Norte e Sudeste constituirá a melhor alternativa de substituição das perdas de energia devido ao uso múltiplo. A necessidade de não mais se considerar a geração como uso prioritário deve-se ao fato que os outros usos, principalmente a irrigação, apresentam hoje maior valor social e econômico.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

### **7.1. Recomendações Gerais**

De acordo com as análises e comentários apresentados ao longo deste relatório, recomenda-se que:

- sejam contratados estudos para desenvolvimento e implantação de modelos de planejamento da operação do sistema de reservatórios da bacia do rio São Francisco que considerem adequadamente o uso múltiplo da água, em particular a irrigação, uma vez que este é o uso que afeta mais intensamente a geração de energia elétrica;
- sejam contratados estudos para revisão das séries hidrometeorológicas empregadas no planejamento da operação do sistema hidrelétrico do São Francisco, visto que hoje existem inconsistências nas séries, afetando diretamente resultados de modelos, análises, etc;
- sejam levantados dados atuais de demandas de usos, irrigação, controle de cheias, etc. para análises prospectivas mais robustas da situação futura, destacando mais uma vez a irrigação como uso mais competitivo com a geração de energia no rio São Francisco; este trabalho, na medida do possível, deverá ser feito em parceria com o Plano de Bacia Hidrográfica do São Francisco, conforme estabelece o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Brasil;
- sejam contratados estudos para desenvolvimento e implantação de modelos para análise e suporte à tomada de decisão multicritério, ferramentas adicionais ao modelo de planejamento da operação proposto; tendo em vista a gestão colegiada dos recursos

hídricos no Brasil, esta ferramenta poderia dar suporte às discussões que a ANA, a ANEEL, o Comitê da Bacia do rio São Francisco, o ONS e outras entidades certamente terão quando tiverem que decidir sobre problemas/soluções que envolvam os diferentes usos competitivos da água na bacia;

- seja desenvolvido estudo para expansão da rede de monitoramento hidrometeorológico na bacia, tendo em vista atender às necessidades de planejamento, operação e controle dos usos da água no rio São Francisco;
- seja desenvolvido estudo científico mais apurado sobre o processo de evaporação na bacia do rio São Francisco, visto que existem inconsistências enormes entre algumas séries históricas e estatísticas disponíveis; constatou-se, preliminarmente, neste trabalho que as perdas de água por evaporação, principalmente no reservatório Sobradinho, são muito grandes, afetando diretamente as regras operacionais e trazendo perdas significativas, em destaque para o setor elétrico;
- a ANA passe a discutir de forma mais intensa com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) a questão de uso múltiplo, uma vez que a metodologia atual de planejamento da operação elétrica é ineficaz para tratar com a questão dos usos competitivos numa mesma bacia;
- seja ampliada a capacidade da interligação elétrica entre a região Nordeste com as regiões Sudeste/Centro-Oeste e Norte para liberar a água do São Francisco para os usos múltiplos sem impactar o suprimento de energia da região.

## **7.2. Recomendação Específica: Desenvolvimento e Implantação de Modelo de Otimização da operação do Sistema de Reservatórios do rio São Francisco considerando Usos Múltiplos.**

Recomenda-se, para a solução das questões operativas dos reservatórios da bacia do rio São Francisco, os quais são utilizados principalmente para a geração de energia elétrica e irrigação, uma modelagem baseada no método das restrições, definindo-se uma função objetivo que visa otimizar a produção energética sujeita a diversas restrições, entre elas, a garantia de água para atendimento das demandas de irrigação. O embasamento para essa recomendação pode ser atribuído às seguintes considerações:

- o método permite visualizar de forma clara e objetiva os “trade-offs” (relações de troca) entre os usos conflitantes de geração de energia e irrigação;
- não exige que sejam definidos, a priori, o peso relativo de cada objetivo inserido na função objetivo, evitando-se assim parâmetros subjetivos;
- evita-se um grande esforço para tratamento matemático e computacional do problema, uma vez que o método com a função objetivo geral e ponderada envolve um número muito maior de variáveis de decisão.

Os fundamentos metodológicos para o desenvolvimento desse modelo foram apresentados no sub item 4.3, que trata do equacionamento geral do problema de otimização da operação de um sistema de reservatórios. Em linhas gerais, o modelo deve atender aos seguintes requisitos:

- representação dos reservatórios de forma individualizada, com capacidade para modelagem de no mínimo 20 (vinte) aproveitamentos;
- passo de cálculo mensal e possibilidade de processamento contínuo de no mínimo 5 anos (60 meses);
- utilização de rotinas de otimização não linear;

- tratamento do problema de otimização segundo o método das restrições, com função objetivo energética, sujeita à garantia de atendimento das demandas para os demais usos das água;
- otimização global da função objetivo considerando todos os passos de cálculo;
- implantação de interfaces gráficas e amigáveis para entrada e saída de dados e resultados;
- processamento sobre plataforma Windows;
- otimização do tempo de processamento, sem comprometimento da representatividade e da precisão dos resultados;
- considerar a possibilidade de ampliações futuras, como a inclusão de demais restrições (elétricas, por exemplo), tratamento estocástico das afluências, intercâmbios entre sub-sistemas, etc.

O modelo deve ser desenvolvido por equipe vinculada a entidade ou grupo de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, com larga experiência, tanto no tratamento matemático e computacional do problema, como na área de operação de sistemas de reservatórios para usos múltiplos, sob a coordenação da ANA e apoio do ONS, da CHESF, da CEMIG e da ELETROBRÁS.

Estima-se que para desenvolver e implantar esse modelo sejam necessários 18 meses, a um custo de aproximadamente US\$ 300.000,00, utilizando-se uma equipe com os seguintes especialistas: 1 coordenador de projeto (18 meses, US\$ 44.000,00), 1 consultor internacional (4 meses, US\$ 16.000,00), 3 engenheiros sênior (18 meses, US\$ 180.000,00) e 1 analista de sistemas sênior (18 meses US\$ 60.000,00).

O produto final é um software a ser usado permanentemente pelas entidades envolvidas na operação do São Francisco nas atividades de planejamento e programação das defluências, ponderando as relações de troca entre os usos conflitantes. Além disso, esse software pode ser utilizado nas fases de estudos e planejamento de novos aproveitamentos e para subsidiar estudos de gestão de recursos hídricos.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	1
<b>1. PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO E DADOS BÁSICOS</b>	1
1.1 Reservatórios existentes e suas características	1
1.2 Informações hidrometeorológicas	4
<b>2. USO MÚLTIPLO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO</b>	7
2.1 Situação atual e legislação	7
2.2 Definição de restrições e demandas não consuntivas na bacia	9
2.3 Definição de demandas consuntivas	12
<b>3. DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DOS MODELOS DO ONS</b>	13
3.1. NEWAVE	13
3.2. DECOMP	18
3.3. Apreciação da modelagem do ONS quanto aos recursos hídricos	20
<b>4. METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS COM FINS MÚLTIPLOS</b>	21
4.1. Operação de Sistemas de Reservatórios	21
4.2. Escolha do Modelo	23
4.3. Equacionamento Geral do Modelo	25
4.4. Relações de Trocas entre Usos	30
4.5. Rotinas de Otimização	31
<b>5. SUBSÍDIOS PARA PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DOS PRINCIPAIS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO</b>	32
5.1 Consolidação dos estudos	32
5.2. Ensaio do Modelo	32
5.3 Resultados obtidos	35
<b>6. CONCLUSÕES</b>	40
<b>7. RECOMENDAÇÕES</b>	42
7.1. Recomendações Gerais	42
7.2. Recomendação Específica	43
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	45
8.1. Específica	45
8.2. Geral	45
<b>9. ATORES</b>	48
9.1. Organismos Governamentais	48
9.2. Equipe do Subprojeto	48

## **ANEXOS**

<b>1.- EVAPORAÇÕES LÍQUIDAS NAS USINAS HIDRELÉTRICAS</b>	<b>49</b>
<b>2.-INVENTÁRIO DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS HIDRÁULICAS DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS</b>	<b>52</b>
<b>3.- A CRISE DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA – O CASO DO RIO SÃO FRANCISCO</b>	<b>59</b>

## **LISTA DE QUADROS**

	<b>pág.</b>
1 - Reservatórios Hidrelétricos da Bacia do Rio São Francisco	2
2 - Vazões Incrementais Médias Mensais no Período 1931 a 1998 (m <sup>3</sup> /s)	4
3 - Evaporação Líquida (mm/mês) SisEvapo - Normais 61-90	6
4 - Evaporação Líquida (mm/mês) SIPOT	6
5 - Resumo das Restrições Hidráulicas Existentes na Bacia	9
6 – Volumes de Espera	11
7 - Estimativa da área Irrigada na Bacia do Rio São Francisco (em hectare)	12
8 - Estimativa da Vazão Média Anual Retirada para Irrigação na Bacia do Rio São Francisco (em m <sup>3</sup> /s)	12
9 - Fator de Sazonalidade Médio (ANA) para as Demandas na Bacia do Rio São Francisco	12
10 - Principais Reservatórios do São Francisco	17
11 – Dados Físicos das Usinas	34
12 – Polinômios das Usinas	34
13 – Dados de Vazões, Volumes de Espera, Evaporação e Uso Consuntivo das Usinas	34
14 - Estatística das Vazões Incrementais Médias Mensais no Período 1931 à 1998	35
15 – Resultados da Otimização	35
16 – Comparação de Casos	37

## **LISTA DE FIGURAS**

	<b>pág.</b>
1 – Esquema da Bacia do Rio São Francisco	2
2 – Postos Fluviométricos na Bacia do Rio São Francisco	5
3 – Gráficos de Evaporação Líquida nos Reservatórios	7
4 - Fluxograma do Modelo NEWAVE	15
5.- Ilustração de uma Usina Hidroelétrica	25
6. – Representação de um Sistema Hidroenergético	26
7 – Curva de Troca entre Dois Objetivos: Energia Elétrica e Irrigação	31
8 – Tela Principal da Planilha	33
9 – Curvas de Troca entre Usos	36
10 – Caso 2: Sem restrições de Volume de Espera e de Vazão Mínima Cenário Mediano	38
11 – Caso 4: Sem Volume de Espera – Cenário Mediano	39
12 – Caso 1: Situação em 2002 - Cenário Mediano	39

## **LISTA DE FOTOS**

	<b>Pág.</b>
1 – Usina Hidrelétrica Paulo Afonso	3
2 – Usina Hidrelétrica Itaparica	3
3 – Usina Hidrelétrica Xingo	3

## **LISTA DE SIGLAS**

<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas
<b>CEMIG</b>	Companhia de Energia de Minas Gerais
<b>CHESF</b>	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
<b>GEF</b>	Fundo Mundial para o Meio Ambiente
<b>OEA</b>	Organização dos Estados Americanos
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>PNUMA</b>	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>DSS</b>	Decision Support Systems
<b>ENA</b>	Energia Natural Afluente
<b>ITP</b>	Itaparica
<b>JUS</b>	Jusante
<b>PAM</b>	Paulo Afonso – Moxotó
<b>PD</b>	Programação Dinâmica
<b>PDDE</b>	Programação Dinâmica Dual Estocástica
<b>PDE</b>	Programação Dinâmica Estocástica
<b>PL</b>	Programação Linear
<b>PNL</b>	Programação Não Linear
<b>MLT</b>	Média de Longo Termo
<b>MONT</b>	Montante
<b>MW</b>	Megawatt
<b>TMA</b>	Três Marias
<b>SOB</b>	Sobradinho
<b>XIN</b>	Xingó