

A OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS SUJEITOS A TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS - ESTUDO DE CASO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS RECEPTORAS DE ÁGUAS DA TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

Pedro A. Molinas¹, Francisco J. Sarmiento²

Resumo - A operação de reservatórios sujeitos a adução de vazões transpostas apresentam comportamentos diferenciados. O avaliação de Políticas de operação para este tipo de reservatórios permite identificar os ganhos efetivos decorrentes dos processos de transposição. No contexto do Projeto de Transposição de Águas do rio São Francisco para o Nordeste Setentrional, foram avaliadas as possíveis políticas de operação dos reservatórios compensadores das bacias receptoras, mediante a utilização de modelos híbridos de simulação e modelos de otimização lineares e não-lineares. Os resultados obtidos confirmam a expectativa de ganhos consideráveis nas vazões regularizadas dos reservatórios, quando se dispõe de fonte exógenas de suprimento hídrico.

Abstract - Operating reservoirs subject to transposed pumping flow presents singular results. The evaluation of such reservoir operating politics allows identifying the effective profit due to transboundary processes. In the context of São Francisco River Water Transboundary Project, possible operating politics for compensating reservoirs in target basins were evaluated making use of hybrid simulation models and both linear and non-linear optimization models. Such applications results confirmed consirable profits expectation in regulated flows when outer water sources are available.

Palavras-chave - Transposição - Operação de reservatórios - Otimização

¹ Consultor Independente. Av. Dom Luís 300/707, Fortaleza, CE. CEP 60.160.230. Fone: 85-2649700. Email: molinas@secrel.com.br

² SEPRE-FUNCATE-UFPB, C.T., Campus I, João Pessoa, PB. CEP 58.059.900. Fone: 83-2261945

INTRODUÇÃO

No contexto de elaboração do Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional (SEPRE-FUNCATE, 1997), foram avaliadas exaustivamente as políticas de operação dos reservatórios compensadores das bacias receptoras dado que, o elevado custo dos bombeamentos faz com que toda e qualquer perda de água transposta repercuta de forma direta na viabilidade do empreendimento. Assim, a ampla rede de reservatórios existentes e projetados nas bacias receptoras foi objeto de uma minuciosa avaliação de abrangência regional com técnicas computacionais especialmente desenvolvidas para esses fins. As metodologias empregadas tinham por objetivo definir, com maior precisão, os efeitos sinérgicos já observados na revisão do projeto realizada em 1994 (Molinas et al., 1995, Sarmiento et Al., 1996, Molinas, 1996, Cagnin, 1996).

Os reservatórios estudados

Foram considerados todos os reservatórios existentes e projetados com capacidade superior a 10 hm³, no contexto das bacias receptoras (Jaguaribe e Metropolitanas no Ceará, Piranhas-Piancó e Paraíba na Paraíba, Apodi e Piranhas-Açu no Rio Grande do Norte e Brígida e Moxotó em Pernambuco). As figuras 1.a e 1.b apresenta os diagramas unifilares da estrutura de interligação entre os reservatórios pertencentes a cada um dos sistemas estudados.

Figura 1.a: Diagramas Unifilares dos sistemas de reservatórios das bacias receptoras

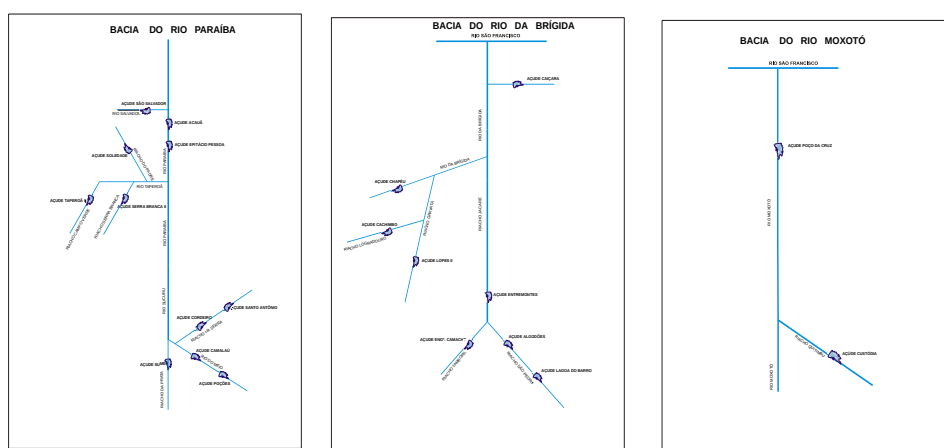


Figura 1.b: Diagramas Unifilares dos sistemas de reservatórios das bacias receptoras

Datos básicos

Os dados básicos dos reservatórios, tais como as características geométricas e curvas cota - área - volume, dados de evaporação de espelho d'água e restrições físicas de operação foram coletados junto ao DNOCS, às Secretarias Estaduais de Recursos Hídricos dos quatro estados envolvidos e nos estudos disponíveis e exaustivamente analisados e revisados.

As séries de vazões afluentes aos reservatórios foram obtidas mediante a aplicação de modelo MODHAC (Lanna e Schwarbach, 1988), devidamente calibrado e, quando possível, validado, com base em dados hidrometeorológicos atualizados e consistidos. A tabela 1 apresenta a lista de reservatórios estudados e as principais informações e parâmetros relacionados com os mesmos.

CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS GERAIS

A metodologia utilizada baseou-se na obtenção dos principais parâmetros de operação dos reservatórios utilizando, duas ferramentas computacionais:

- modelos matemáticos de otimização da operação dos reservatórios, baseados em técnicas de programação linear e não linear do tipo quadrática;
- modelos híbridos que compreendem a simulação do comportamento dos reservatórios e a otimização da operação mediante métodos heurísticos.

Dada a especificidade das ferramentas computacionais acima mencionadas, estas foram utilizadas de forma diferenciada. Todos os reservatórios localizados nas bacias receptoras que com capacidades máximas superiores a 10 hm³ foram objeto de modelagem da operação de sistemas de reservatórios mediante modelos matemáticos de simulação, de forma integrada, o que contempla as interferências existentes entre os mesmos.

Açude (A)	Bacia (B)	Capacidade (1000m3) (C)	Área (bacia n controlada) Km2 (D)	Prec. Média (mm)	Deflúvio (mm) (F)	Coef. Deflúvio (G)	Qreg g=90% (m3/s)	CV	Relação C/D	Relação Qreg/deflúvio (%)	Relação Qreg/(deflúvio+vert) (%)
Poço da Pedra	Jaguaribe	50000	895.52	653.4	51.5	7.88	0.26	1.41	1.08	17.78	
Várzea do Boi	Jaguaribe	51910	1236.2	532	44.8	8.42	0.38	1.58	0.94	21.64	
Favelas	Jaguaribe	30100	667	573.3	62.4	10.88	0.19	1.38	0.72	14.40	
Trussu	Jaguaribe	326790	1533.4	740.9	61.8	8.34	1.03	1.39	3.45	34.28	
Joaquim Távora	Jaguaribe	24105	116.3	718.4	91.3	12.71	0.08	1.19	2.27	23.76	
Riacho do Sangue	Jaguaribe	64124	1366.3	758.2	121.5	16.02	0.66	1.01	0.39	12.54	
Lima Campos	Jaguaribe	66382	358.6	793.2	99.9	12.59	0.34	1.35	1.85	29.93	
Prazeres	Jaguaribe	32500	192	794.1	86.2	10.86	0.3	1.24	1.96	57.16	
Quixabinha	Jaguaribe	32500	90.2	794.1	51.2	6.45	0.06	1.42	7.04	40.97	
Atalho	Jaguaribe	108300	1889.1	902.8	43.9	4.86	0.71	1.68	1.31	27.00	
Riacho dos Carneiros	Jaguaribe	37180	44.6	1010.8	171.8	17.00	0.1	1.15	4.85	41.16	
Orós	Jaguaribe	1956300	20011	706.4	42.9	6.07	12.94	1.47	2.28	47.54	36.7%
Castanhão	Jaguaribe	4451660	16821.6	843.1	66	7.83	21.84	1.33	4.01	62.04	36.6%
Trici	Jaguaribe	16000	559.07	588.5	69.8	11.86	0.15	1.08	0.41	12.12	
Sabugi	Piranhas	65335	844.2	594.6	64.5	10.85	0.46	1.40	1.20	26.64	
Itans	Piranhas	81750	1284.6	543.2	50	9.20	0.51	1.35	1.27	25.04	
Caldeirão Parelhas	Piranhas	10196	1609	473.7	37.4	7.90	0.07	1.62	0.17	3.67	
Boq. Parelhas	Piranhas	85013	1487.45	436.4	24.5	5.61	0.38	1.57	2.33	32.88	
Cruzeta	Piranhas	35000	1043.7	544.2	41.6	7.64	0.25	1.33	0.81	18.16	
Marechal Dutra	Piranhas	40000	2045.45	444.9	22.1	4.97	0.26	1.81	0.88	18.14	
Dourado	Piranhas	10322	311.5	554.8	43.2	7.79	0.05	1.63	0.77	11.72	
Rio da Pedra	Piranhas	12432	155.74	684.3	98	14.32	0.04	1.06	0.81	8.26	
Armando Ribeiro - Açui	Piranhas	2400000	18341.2	699.5	69.3	9.91	19.24	0.98	1.89	47.74	30.0%
Marcelino Vieira	Apodi	11200	309.98	829	96.8	11.68	0.07	0.93	0.37	7.36	
Pau dos Ferros	Apodi	54846	2261.1	851	95	11.16	0.88	0.91	0.26	12.92	
Bonito II	Apodi	10865	178.56	915.1	164.1	17.93	0.1	0.86	0.37	10.76	
Riacho da Cruz II	Apodi	9604	120.72	1022.6	232.7	22.76	0.2	0.83	0.34	22.45	
Tourão	Apodi	9105	93.04	864.8	131	15.15	0.12	0.98	0.75	31.05	
Brejo	Apodi	17000	161.71	806.7	120.5	14.94	0.16	1.03	0.87	25.89	
Lucrécia	Apodi	27270	113	877.1	149.5	17.04	0.18	1.08	1.61	33.60	
Rodeador	Apodi	21700	236.24	863.6	140.3	16.25	0.11	1.00	0.65	10.47	
Sta. Cruz	Apodi	600000	2187.46	801.1	87.4	10.91	4.71	1.02	3.14	77.69	30.7%
Flecha	Apodi	8950	159.22	859	103.3	12.03	0.1	1.03	0.54	19.17	
Angicos	Apodi	3500	139.98	900.7	147.5	16.38	0.02	0.90	0.17	3.05	
Sto. Antonio	Paraíba	21424	108.15	487.6	29.8	6.11	0.03	1.30	6.65	29.36	
Cordeiro	Paraíba	69966	1551.98	499.5	32.7	6.55	0.45	1.43	1.38	27.96	
Poções	Paraíba	29870	72.08	532.2	52.2	9.81	0.02	1.29	7.94	16.76	
Camalaú	Paraíba	46438	1172.83	521.5	47	9.01	0.37	1.44	0.84	21.17	
Sumé	Paraíba	36800	763.44	551.9	56	10.15	0.23	1.21	0.86	16.97	
Taperoá II	Paraíba	15149	574.17	414	29.3	7.08	0.09	1.45	0.90	16.87	
Serra Branca II	Paraíba	14043	54.33	423.3	22.6	5.34	0.0001	1.33	11.44	0.26	
Soledade	Taperoá	27058	281.36	399.9	27.3	6.83	0.15	1.42	3.52	61.58	50.0%
Epitácio Pessoa	Paraíba	535700	7904.23	389	18.9	4.86	3.48	1.53	3.59	73.46	41.9%
Acauã	Paraíba	250000	3671.7	576.7	26.3	4.56	2.5	1.03	2.59	81.64	31.6%
Lagoa do Arroz	Peixe	80221	285.29	881.2	136.3	15.47	0.56	0.94	2.06	45.42	
Piões	Peixe	13000	384.87	870.2	126.7	14.56	0.03	1.06	0.27	1.94	
Bartolomeu I	Piranhas	17571	19.2	811	125.1	15.43	0.04	0.96	7.32	52.52	
Eng. Ávido - Piranhas	Piranhas	255000	890.6	883.8	132.3	14.97	1.96	0.99	2.16	52.46	
São Gonçalo	Piranhas	44600	310.09	884.6	134.9	15.25	0.52	0.84	1.07	39.20	
Carneiro	Piranhas	31286	153.5	753.4	94.7	12.57	0.2	0.92	2.15	43.39	
Eng. Arco Verde	Piranhas	30593	137.88	718.8	88	12.24	0.15	0.94	2.52	38.99	
Escondido	Piranhas	16326	223.46	824.1	118.7	14.40	0.15	0.86	0.62	17.83	
Riacho dos Cavalos	Piranhas	17690	164.42	792.7	112.4	14.18	0.02	0.98	0.96	3.41	
Sta. Rosa	Piranhas	16579	273.13	813.5	111.6	13.72	0.02	0.88	0.54	2.07	
Tapera	Piranhas	26419	135.32	787.6	97.7	12.40	0.11	0.93	2.00	26.24	
Bom Jesus	Piancó	14637	89	668.9	91.5	13.68	0.07	0.92	1.80	27.11	
Bruscas	Piancó	38206	251	771.4	93.2	12.08	0.4	1.04	1.63	53.92	
Cachoeira dos Alves	Piancó	10611	99	770.5	103	13.37	0.11	1.03	1.04	34.02	
Cachoeiras dos Cegos	Piancó	71887	223	843.5	136	16.12	0.35	0.96	2.37	36.39	
Canoas	Piancó	45555	260	799.1	101	12.64	0.46	0.91	1.73	55.24	
Catolé	Piancó	10500	136	686.5	73.4	10.69	0.12	1.08	1.05	37.91	
Curemas-Mãe D'Água	Piancó	1358700	5587	865.3	117.4	13.57	10.53	1.01	2.07	50.63	
Jenipapeiro	Piancó	100000	472	715	104.4	14.60	0.73	0.86	2.03	46.72	
Piranhas	Piancó	25696	204	843.7	104.3	12.36	0.26	1.04	1.21	38.54	
Poço Redondo	Piancó	62751	333	690.7	73.7	10.67	0.34	1.08	2.56	43.69	
Queimadas	Piancó	15625	118	794.1	93.4	11.76	0.09	1.08	1.42	25.75	
Saco	Piancó	97488	354	820.9	110.7	13.49	0.77	1.01	2.49	61.96	
Santa Inês	Piancó	26115	107	780	84	10.77	0.14	1.03	2.91	49.12	
Timbaúba	Piancó	15439	83	774	113.4	14.65	0.11	0.91	1.64	36.86	

Tabela 1: Principais informações dos Reservatórios estudados

Os modelos matemáticos de otimização foram aplicados aos reservatórios estratégicos das bacias receptoras. Ou seja, para aqueles reservatórios para os quais se

cogita o lançamento de vazões transpostas. Neste contexto, foram avaliados os comportamentos de dois funções objetivo que traduzem, sob o ponto de vista hidrológico, os objetivos desejados no aproveitamento dos recursos hídricos de bacias receptoras da Transposição:

- maximizar a oferta hídrica proveniente da infra-estrutura hídrica local, com o mínimo tempo de acionamento do sistema de bombeamento da transposição;
- minimizar as perdas por evaporação ou vertimento nos reservatórios locais, fazendo uso de vazões transpostas complementares, de modo a obter o melhor rendimento possível nos mesmos.

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Sob esta denominação englobam-se os modelos que tem como principal característica reproduzir a operação dos reservatórios sob a hipótese de que o operador conhece o futuro. Isto é, os valores das variáveis de resposta e das diferentes variáveis de decisão como volume de alerta e alerta de bombeamento, são obtidos em condição de “futuro conhecido”, o que difere da realidade em que se encontraria um operador do sistema quotidianamente.

A versatilidade dos softwares empregados na formulação dos modelos de otimização GAMS/MINOS 5.4 e GAMS/CONOPT (Brooke et al., 1998, Stanford University, 1996, ARKI, 1996), permitiu que fossem feitos, com baixo tempo computacional, um elevado número de experimentos numéricos que possibilitaram um acurado conhecimento dos sistemas de reservatórios em estudo, sob as mais diferentes condições de operação.

A seguir são comentados os principais aspectos destes modelos, sua estrutura básica, as formulações das variáveis de decisão utilizadas e as funções objetivo.

Estrutura básica dos modelos e otimização.

A estrutura básica dos modelos de otimização desenvolvidos consiste em três componentes:

a) Parâmetros do modelo. Sob esta denominação englobam-se todas as especificações das características do reservatório a ser estudado, que são:

- vazões afluentes para cada período em que se pretende operar o reservatório, sejam estas provenientes de áreas não controladas, sejam decorrentes de vertimentos ocorridos em reservatórios localizados a montante do sistema em estudo ($Aflu(i)$);
- taxa líquida de evaporação do espelho d'água do reservatório composta pela diferença entre a evaporação potencial média da região do reservatório, descontada da precipitação ocorrida sobre o espelho d'água no mesmo período ($eva(i) - prec(i)$);
- relação funcional existente entre o volume e a área do espelho d'água do reservatório.

b) Variáveis de estado do modelo. As variáveis de estado do modelo permitem descrevem a situação do reservatório em cada intervalo de tempo estudado:

- volume estocado pelo reservatório em cada intervalo de tempo (V_i);

- área do espelho d'água sujeita a evaporação em cada intervalo de tempo (A_i);
- volumes vertidos pelo reservatório em cada intervalo de tempo ($VERT_i$);
- retiradas de água do reservatório (RET_i).

c) Equações e inequações de restrição do modelo. As equações e inequações de restrição do modelo consistem em expressões matemáticas que descrevem a dinâmica do reservatório em cada intervalo de tempo estudado, são estas:

- equação de balanço no reservatório:

$$V_{i+1} = V_i + Aflu(i) - A_i (eva(i) - prec(i)) - VERT(i) - RET(i) \quad (1)$$

- restrições operacionais:

$$V(i) \leq \text{Volume máximo} \quad (2)$$

$$V(i) \geq \text{Volume mínimo} \quad (3)$$

Os parâmetros, as variáveis de estado e as equações e inequações de restrição são comuns a todos os modelos utilizados; pequenas variantes ocorrem quando se estudam sistemas que representam cascatas ou sistemas paralelos de reservatórios, principalmente na formulação das equações de balanço dos reservatórios, onde é expressa a relação de precedência dos reservatórios associados em cascata.

Formulações das variáveis de decisão e funções objetivo do modelo

As diferenças apontadas em cada um dos modelos de otimização empregados são, basicamente, decorrentes da formulação diferenciada das variáveis de decisão e das funções objetivo empregadas. A seguir são apresentadas as principais variantes empregadas para a abordagem deste componente dos modelos:

a) RS1. Trata-se modelo orientado à maximizar as vazões regularizadas para um reservatório isolado. As variáveis de decisão utilizadas são:

- QRA, que representa a parcela da vazão regularizada pelo reservatório que é fornecida de forma ininterrupta, ou seja inclusive durante os períodos de possível colapso no abastecimento;
- QRB(i), é a outra variável de decisão e representa a parcela da vazão regularizada que é entregue exclusivamente durante os períodos ditos normais (nestes estudos foi adotada igual à metade da vazão regularizada, não obstante, possa ser qualquer fração não nula da mesma).

Assim:

$$RET(i) = QRA + QRB(i) \quad (4)$$

onde “QRA” é uma constante não nula e “QRB(i)” pode adotar valores nulos ou iguais a “QRA”.

As equações de restrição adicionais desta formulação são as seguintes:

$$QRA > \text{zero} \quad (5)$$

$$QRB(i) \leq QRA \quad (6)$$

$$\sum QRB(i) \geq QRA \times (\text{garantia}) \times (\text{número de períodos de estudo}) \quad (7)$$

A função objetivo utilizada é:

$$\text{maximize } z = \sum \text{QRB}(i) + \text{QRA} \times (\text{número de períodos de estudo}) \quad (8)$$

Este modelo fornece como resultado a vazão regularizada com uma determinada garantia, sob a hipótese de suprimento de uma vazão de emergência não nula. Sua utilização é voltada à obtenção de vazões regularizadas máximas, sob futuro conhecido e representa uma formulação básica de teste a ser utilizada previamente à aplicação de formulações mais complexas.

b) – RM1. Trata-se de um modelo orientado à maximização das vazões regularizadas para uma cascata de reservatórios. As variáveis de decisão utilizadas são as mesmas do modelo RS1, com a diferença que neste modelo trata-se de vazões regularizadas por um sistema de reservatórios.

As equações de restrição adicional e função objetivo desta formulação são semelhantes às do modelo RS1, não obstante devem ser alteradas as equações de balanço de modo tal que as retiradas e vertimentos dos reservatórios localizados a montante do último reservatório converjam para o mesmo, conforme a topologia do sistema.

Este modelo fornece como resultado a vazão regularizada, com uma determinada garantia para uma cascata de reservatórios. Sua utilização é voltada à obtenção de vazões regularizadas máximas, sob futuro conhecido para sistemas reservatórios em estudo, permitindo verificar a ocorrência de ganhos na operação conjunta de reservatórios e, também, representa uma formulação básica de teste a ser aplicada previamente às formulações voltadas para a avaliação do comportamento de sistemas de reservatórios sujeitos a bombeamentos.

Uma variante deste modelo inclui, além de uma vazão regularizada pelo sistema e captada no extremo de jusante do mesmo, a exigência de que cada reservatório forneça vazões regularizadas locais não computadas na regularização do sistema. Isto é feito mediante a incorporação de um conjunto de variáveis e restrições semelhantes à já descrita para cada reservatório do sistema.

c) RS-BOMB. Trata-se de um modelo orientado à maximização das vazões regularizadas para um reservatório isolado, sujeito a bombeamento de vazões transposta, minimizando o tempo de bombeamento de vazões transpostas.

As variáveis de decisão consideradas são as mesmas utilizadas no modelo RS1, com a diferença que neste modelo inclui-se uma nova variável de decisão: “Qbomb(i)”, que representa a vazão bombeada ao reservatório em cada período de análise.

As equações de restrição adicional deste modelo incluem as contidas no modelo RS1, acrescidas das seguintes restrições:

$$\text{Qbomb}(i) \leq \text{capacidade máxima de bombeamento definida exogenamente.} \quad (9)$$

A função objetivo utilizada é:

$$\text{maximize } z = \sum \text{QRB}(i) + \text{QRA} \times (\text{nro. de períodos de estudo}) - \sum \text{Qbom}(i) \quad (10)$$

Este modelo fornece como resultado a vazão regularizada, com uma determinada garantia, para um reservatório sujeito a bombeamento. Note-se que a inclusão com sinal negativo do somatório de bombeamentos na função objetivo permite que a solução obtida represente a máxima vazão regularizada com o mínimo gasto de energia em bombeamento de vazões transpostas.

A utilização deste modelo é voltada à obtenção de vazões regularizadas máximas sob futuro conhecido para os reservatórios que serão corpos receptores da Transposição.

d) RM-BOMB. Trata-se de um modelo orientado à maximização das vazões regularizadas para uma cascata de reservatórios, sujeitos a bombeamento de vazões transpostas, minimizando o tempo de bombeamento de vazões transpostas.

Este modelo apresenta uma formulação similar ao modelo RM-1, e, também, todas as características do modelo RS-BOMB, o que permite avaliar sistemas de reservatórios sujeitos a vazões transpostas, orientando a distribuição das vazões transpostas entre reservatórios, considerando a topologia em cascata do sistema.

e) RSB-MIN. Trata-se de um modelo orientado à minimização das perdas por vertimento e evaporação para um reservatório isolado, sujeito a bombeamento de vazões transposta, variando o tempo de bombeamento das vazões transpostas.

Este modelo foi desenvolvido de modo a analisar soluções que não visam maximizar a vazão regularizada, e sim, otimizar os recursos hídricos locais.

A experiência obtida com base no modelo RS-1 mostrou que ambas parcelas da vazão regularizada (QRA e QRB(i)) podiam passar a ser tratadas como restrições adicionais à solução do modelo mediante a utilização de igualdades.

Assim, para o modelo RSB-MIN, a equação $\Sigma QRB(i) \geq QRA \times (\text{garantia}) \times (\text{número de períodos de estudo})$, foi substituída por:

$$\Sigma QRB(i) = QRA \times (\text{garantia}) \times (\text{número de períodos de estudo}) \quad (11)$$

Esta forte restrição diminui o domínio de soluções do sistema de equações, tornando a computação mais demorada e com mais risco de ocorrerem casos com matrizes singulares, isto é, a ocorrência de matrizes de coeficientes que inviabilizam a aplicação do método simplex, no qual baseia-se o software MINOS 5.4. Nestes casos a substituição do MINOS 5.4 pelo CONOPT mostrou-se bastante vantajosa em tempos de computação, não tendo se registrado nenhum caso onde o modelo CONOPT não convergiu.

A função objetivo utilizada foi a seguinte:

$$\text{minimize } z = \Sigma \text{volumes evaporados} + \Sigma \text{volumes vertidos} \quad (12)$$

O tempo máximo de bombeamento foi restrito mediante uma variável exógena:

$$\Sigma Q_{\text{bomb}}(i) \leq (\% \text{ da vazão nominal de bombeamento}) \times (\text{nro de períodos de operação}) \quad (13)$$

A ocorrência de vazões bombeadas que não obedecem ao critério “liga/desliga”, isto é, não são nulas nem iguais ao valor máximo nominal possível de ser bombeado foi resolvido mediante a incorporação de um artifício: a inclusão, na função objetivo, de um termo que inibe a ocorrência destes eventos com um fator de escala bem inferior ao da variável a ser minimizada.

Este recurso, usual em modelos de otimização, é denominado “penalização” de soluções e permite “forçar” o modelo a restringir o domínio de solução exclusivamente às soluções de interesse.

f) RMB-MIN. Trata-se de um modelo orientado à minimização das perdas por vertimento e evaporação para uma cascata de reservatórios, sujeitos a bombeamento de vazões transpostas, variando o tempo de bombeamento das vazões transpostas.

Este modelo é similar em sua formulação ao modelo RSB-MIN, acima descrito; não obstante, devem ser alteradas as equações de balanço de modo tal que as retiradas e vertimentos dos reservatórios localizados a montante do último reservatório convirjam conforme a topologia do sistema.

MODELOS HÍBRIDOS DE SIMULAÇÃO

Sob esta denominação engloba-se os modelos utilizados que têm como principal característica reproduzir a operação dos reservatórios sob a premissa de que o operador desconhece o futuro e não utiliza nenhum tipo de ferramenta de previsão de vazões afluentes ao reservatório. Isto é, os valores das variáveis de resposta e das diferentes variáveis de decisão são obtidos em condições semelhantes as que atualmente se encontram os operadores dos reservatórios.

A diferença entre os modelos ditos de simulação e os denominados híbridos reside no fato de que, nestes últimos, recorre-se a técnicas heurísticas de otimização para a busca de ótimos das variáveis de decisão, mediante a execução de um elevado número de simulações, diferenciadas pela adoção de diferentes valores das variáveis de decisão. A formulação do modelo híbrido utilizado se baseia-se no conceito de “Volume de Alerta” e “Alerta de Bombeamento” já apresentado em vários trabalhos (SRH-CE, 1991, Molinas et Al., 1995, Sarmiento et Al., 1996, Molinas, 1996). O modelo aqui utilizado é uma versão melhorada com recursos adicionais decorrentes da utilização de uma interface gráfica que permite o fácil manuseio de sistemas complexos de reservatórios.

Em função do acima exposto e do exíguo espaço disponível, só serão discutidos os aspectos relacionados com as fórmulas empregadas para quantificar os ganhos decorrentes de cada tipo de operação pesquisado.

Com o objetivo de melhor explicitar a interdependência entre as variáveis envolvidas no sistema analisado (vazão regularizada, vazão transposta, tempo de bombeamento, volumes de alerta e alerta de bombeamento) foram introduzidos indicadores que exprimem o efeito das vazões transpostas nos reservatórios, evidenciando a “eficiência” de cada reservatório. Nesta ótica, são a seguir apresentados os referidos indicadores:

Sinergia: parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório que ultrapassa o acréscimo decorrente da vazão bombeada. A Sinergia é definida como:

$$\text{Sinergia} = Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} t_b / t_s \quad (14)$$

onde “ Q_{r-ct} ” é a vazão regularizada pelo reservatório ou sistema sujeito a transposição, “ Q_{r-st} ” é vazão regularizada sem transposição, “ Q_{sf} ” a vazão nominal transposta e “ t_b ” e “ t_s ” são os tempos de bombeamento e de simulação, respectivamente.

Sinergia Adimensional: este indicador traduz uma espécie de relação benefício - custo sob uma ótica hidrológica. Nesse contexto o “benefício” é representado pelos incrementos de vazão regularizada do reservatório (Sinergia), enquanto que os custos se

traduzem através da vazão efetivamente transposta. A Sinergia Adimensional é definida como:

$$\text{Sinergia Adimensional} = \frac{Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} t_b / t_s}{Q_{sf} t_b / t_s} \quad (15)$$

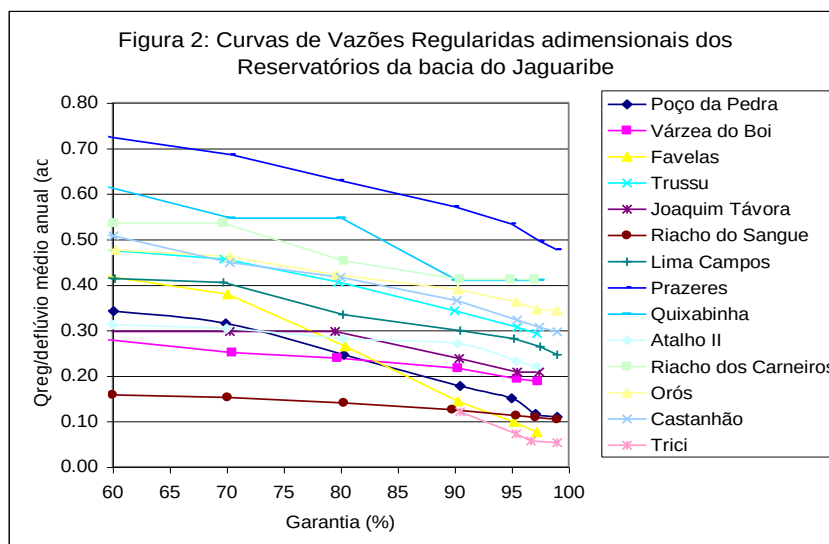
RESULTADOS OBTIDOS

A aplicação dos modelos híbridos de simulação e de otimização da operação dos reservatórios gerou um volume muito grande de resultados numéricos, sob a forma de listagens e planilhas. Em consequência, resulta impossível apresentar, no contexto deste artigo, todos os resultados obtidos. Optou-se por selecionar, para apresentação, os parâmetros e variáveis mais representativos e mostrar os mesmos sob a forma de gráficos e tabelas.

Obtenção de vazões regularizadas para os reservatórios das bacias receptoras

O primeiro passo para a caracterização das disponibilidades hídricas das bacias receptoras consistiu na quantificação das vazões regularizadas pelo sistema de reservatórios. Isto foi obtido mediante a aplicação de modelos híbridos de simulação aos sistemas de reservatórios em cada uma das bacias receptoras, segundo os diagramas unifilares já apresentados.

O principal resultado obtido mediante a aplicação do referido modelo são as curvas que relacionam as vazões regularizadas com as respectivas garantias associadas, para cada um dos reservatórios estudados. A figura 2 apresenta os resultados para os reservatórios da Bacia do rio Jaguaribe. No figura pode-se constatar uma das principais características da disponibilidade hídrica no Nordeste Setentrional: a sensível diminuição da oferta hídrica quando os reservatórios são operados com garantias de atendimento elevadas (95 – 99%).



Otimização das vazões regularizadas

O segundo passo na caracterização das disponibilidades hídricas consistiu na aplicação dos modelos de otimização. Para isto foi utilizado o modelo denominado RS-1, o qual foi aplicado aos reservatórios estratégicos de cada bacia receptora. As afluências provenientes das áreas a montante destes reservatórios, controladas por reservatórios de menor porte foram consideradas mediante a inclusão dos vertimentos destes reservatórios obtidas com base nas simulações apresentadas no item anterior.

Como hipótese de trabalho, considerou-se que as vazões regularizadas por estes reservatórios, de menor porte, são completamente consumidas na vizinhança dos mesmos, não contribuindo para os grandes reservatórios das bacias receptoras.

A tabela 1 apresenta um estudo comparativo das vazões regularizadas obtidas mediante a aplicação de modelos de simulação e mediante os de otimização. As diferenças entre os valores de vazões regularizadas obtidos mostra que o efeito da incerteza sobre o futuro manifesta-se na forma de redução das vazões efetivamente regularizadas; porém, a medida que as garantias atingem valores vizinhos a 100%, a diferença entre os resultados obtidos, mediante simulação e diminui consideravelmente.

Tabela 1 - Estudo Comparativo das Vazões Regularizadas Obtidas Mediante a Aplicação de Modelos de Simulação e Mediante a Aplicação de Modelos de Otimização

Açude	Q ₉₀ (m ³ /s)		Q ₉₅ (m ³ /s)		Q ₉₉ (m ³ /s)	
	simulação	otimização	simulação	otimização	simulação	otimização
Armando Ribeiro Gonçalves	19.24	23.55	17.77	20.74	15.00	15.45
Boqueirão de Cabaceiras	3.48	3.61	3.18	3.27	2.90	2.95
Castanhão	21.75	25.23	19.17	20.70	17.78	16.94
Coremas - Mãe D'água	10.53	13.56	9.60	12.01	8.50	10.40
Poço da Cruz	1.74	2.19	1.55	1.99	1.35	1.83
Entremontes	1.31	1.78	1.46	1.49	1.04	1.28
Orós	12.20	14.94	11.62	12.20	9.39	10.00
Santa Cruz	4.60	7.12	3.95	5.52	3.44	4.10

Vazões transpostas e ganho sinérgico

O projeto de Transposição de Águas do rio São Francisco para o Nordeste Setentrional tem como objetivo prioritário viabilizar o aproveitamento ótimo das disponibilidades hídricas das bacias receptoras, visto que a interligação destas com uma fonte hídrica perene introduz um fator de redução na variabilidade das afluições aos reservatórios existentes e, conseqüentemente, a ocorrência de ganhos sinérgicos de operação.

De fato, a certeza da disponibilidade controlada de recursos hídricos exógenos às bacias receptoras permite uma operação dos reservatórios sob condições mais arrojadadas que se traduz em dois aspectos determinantes da maximização das disponibilidades:

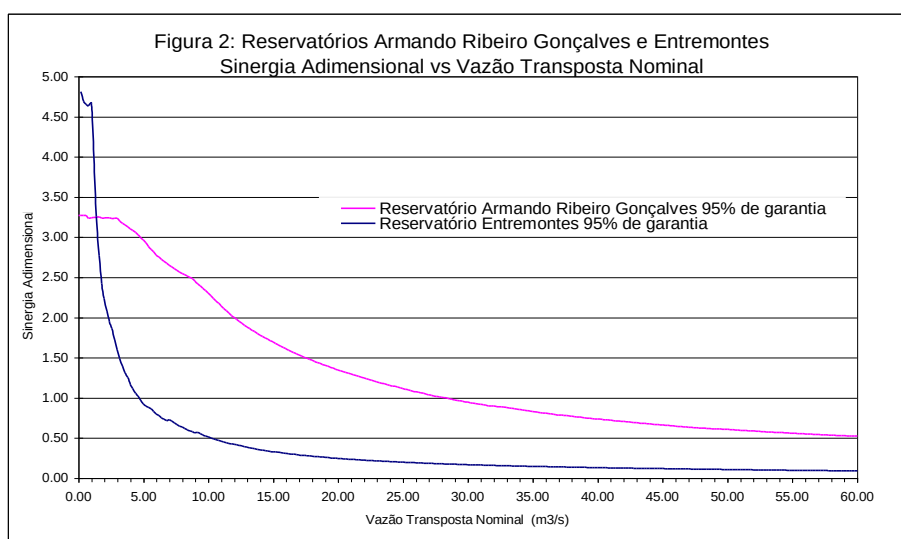
- redução das perdas totais (por evaporação e vertimentos não controlado);
- maximização da vazão regularizada.

Para avaliação dos máximos ganhos sinérgicos teóricos, foram operados, sob condições de futuro conhecido, os principais reservatórios das bacias receptoras para um amplo leque de vazões nominais transpostas, mediante o uso do modelo RS-BOMB.

A título de exemplo são apresentadas as curvas de Sinergia Adimensional vs. Vazão Transposta Nominal, correspondentes ao reservatório Armando Ribeiro Gonçalves e Entremontes, para a garantia de 95%. A figura 2 mostra estes resultados, evidenciando a importância das dimensões do reservatório receptor de vazões transpostas para a obtenção de ganhos sinérgicos representativos.

Os resultados apresentados permitem visualizar o ganho real em termos de sinergia, tendo-se como variável independente a vazão transposta. Entretanto, estes resultados não permitem identificar a vazão ou faixa de vazões mais apropriada para ser aduzida a cada reservatório. Isto deve-se ao fato de sempre existirem ganhos sinérgicos, na medida em que ocorrem incrementos na vazão transposta, muito embora, estes sejam continuamente decrescentes.

Este comportamento das funções de sinergia (monótona crescente quando se trata de ganhos sinérgicos absolutos e, monótona decrescente quando se trata de ganhos sinérgicos marginais ou adimensionais), exigiu a busca de outro critério para a escolha das vazões a ser transposta, como, por exemplo, a minimização das perdas por evaporação e vertimento.



A minimização de perdas como critério para a operação dos reservatórios sujeitos a adução de vazões transpostas

Dado que os resultados obtidos com base em modelos de maximização de vazões regularizadas não foram conclusivos para a seleção de vazões a serem transpostas, se procedeu a pesquisar funções objetivo associadas com a minimização das perdas totais por vertimento e evaporação do espelho d'água, as quais podem constituir um critério, segundo o qual, seja possível determinar as regras de operação dos reservatórios considerando vazões transpostas.

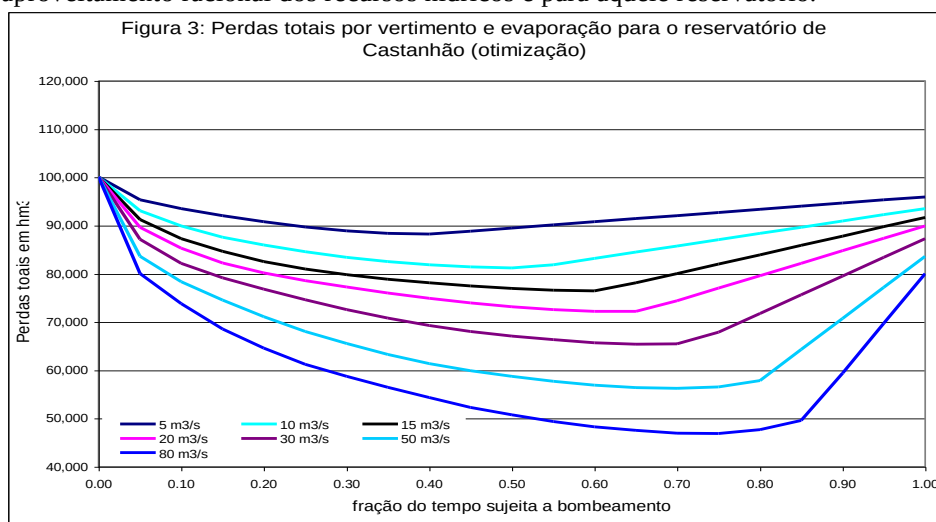
Isto se fundamenta no fato de que deveria existir um conjunto de variáveis de decisão que configurem uma situação na qual as perdas por vertimento e evaporação atingem um mínimo em cada reservatório.

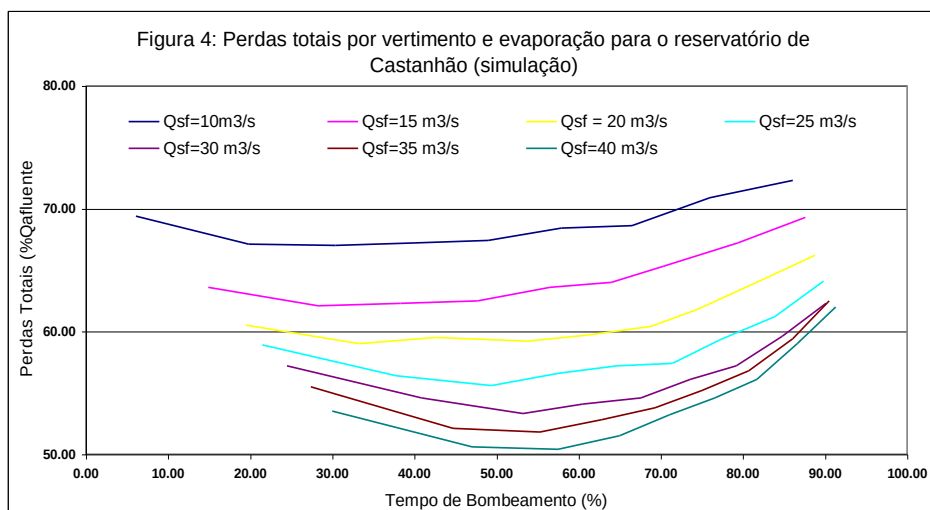
Este ponto de mínimo pode ser determinado para cada valor diferente de vazão nominal transposta, tendo como variável de decisão o tempo de bombeamento ou o alerta de bombeamento.

As figuras 3 e 4 apresenta, a título de exemplo, os resultados obtidos com base em nos modelos de otimização e híbridos de simulação, das curvas de perdas totais em função do tempo de bombeamento, para diferentes vazões transpostas nominais e para vazões regularizadas com garantia de 90% no reservatório Castanhão.

Como é visível nas figuras acima, para cada vazão transposta nominal, é possível identificar um ponto para o qual as perdas totais são mínimas. Selecionando em cada curva o ponto de mínimo é possível construir uma nova curva composta por todos pontos ótimos que reflete os ganhos sinérgicos máximos associados com o melhor aproveitamento dos recursos hídricos locais.

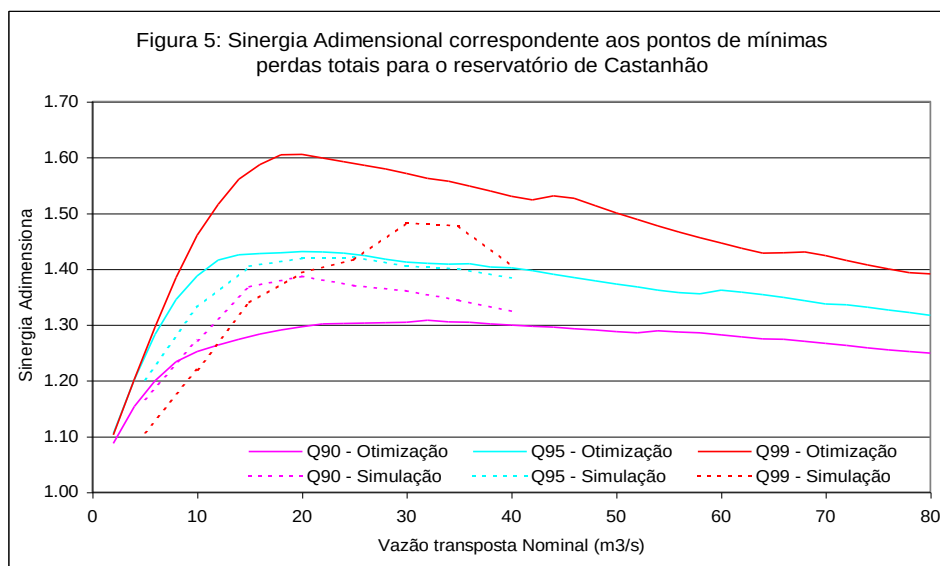
A figura 5 apresenta estas curvas, obtidas com base em modelos de otimização e híbridos de simulação, para diferentes garantias no reservatório Castanhão, onde novamente é evidenciado um ponto de máxima sinergia, susceptível de ser associado como a melhor escolha de vazão transposta, da perspectiva do aproveitamento racional dos recursos hídricos e para aquele reservatório.





O comportamento de todas as curvas segue o padrão esperado, ou seja, para uma vazão transposta fixa, frequências mais elevadas de bombeamento originam perdas totais mais elevadas, devida à maior frequência de áreas maiores expostas à evaporação bem como de vertimentos, também, mais frequentes.

Reduzindo-se a frequência de bombeamento, ocorrem, mais frequentemente, níveis mais baixos no reservatório, implicando numa redução das perdas. Isto se ocorre até atingir um mínimo, a partir do qual, os tempos de residência das águas nos reservatórios aumentam para manter os mesmos níveis de garantia e, conseqüentemente, aumentam as perdas por evaporação.



Operação integrada dos sistemas de reservatórios

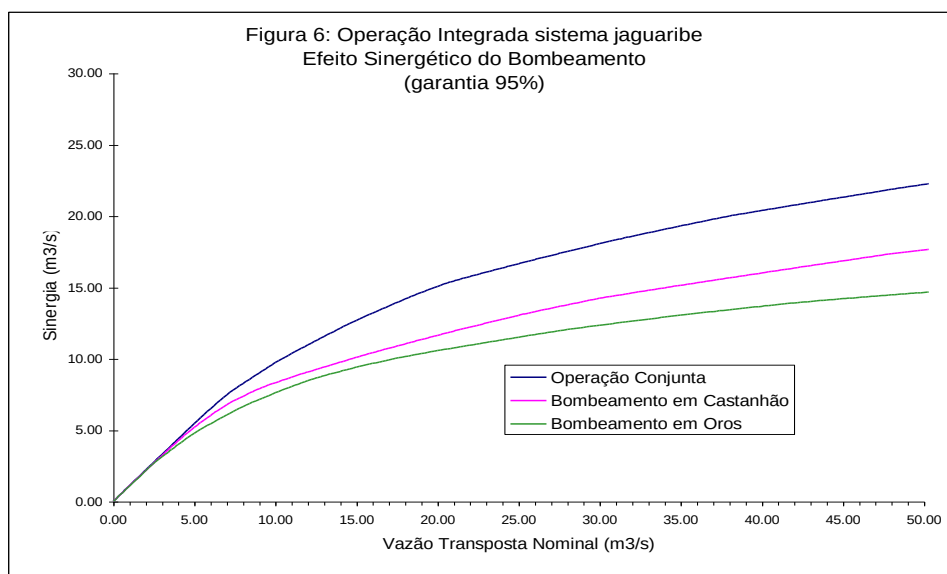
É um fato amplamente divulgado na bibliografia que a operação de reservatórios pertencentes a uma mesma bacia hidrográfica, ou vinculados mediante obras de adução, apresenta ganhos adicionais quando os reservatórios são operados de forma conjunta.

Isto foi levado em conta nos estudos de operação integrada das bacias hidrográficas receptoras. Não obstante, alguns aspectos específicos da configuração da infra-estrutura hídrica estudada contribuíram para que esta integração seja, de algum modo, restrita.

A configuração básica dos diagramas unifilares da infra-estrutura hídrica das bacias receptoras consiste, de um modo geral, num importante conjunto de reservatórios de médio porte e um ou dois reservatórios de grande porte, localizados no trecho médio ou inferior de cada bacia receptora, sujeitos a receber vazões transpostas. Como já foi discutido anteriormente, as vazões regularizadas pelo conjunto de reservatórios de médio porte, localizados nas altas bacias e não sujeitos a transposição, foram consideradas como consumidas localmente e, em consequência, não sujeitas a operação conjunta com os grandes reservatórios compensadores da transposição.

Os únicos sistemas de reservatórios que cumpre com os requisitos acima discutidos são os correspondentes a bacia do rio Jaguaribe, composto pelos reservatórios de Castanhão e Orós e o da bacia do rio Piranhas-Açu, composto pelos reservatórios de Coremas-Mãe D'água e Armando Ribeiro Gonçalves.

A modo de exemplo, são apresentados os resultados comparativos para o sistema da bacia do Jaguaribe na figura 6.



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os trabalhos descritos neste artigo se constituem numa substancial análise do comportamento dos mais importantes reservatórios construídos no nordeste setentrional.

Até o presente carecia-se de uma detalhada análise do comportamento desse tipo de reservatório, principalmente, de regras operacionais consistentes para a operação dos mesmos, quando sujeitos a aduções de vazões exógenas às bacias contribuintes.

Ao longo dos trabalhos foi pesquisado um elevado número de alternativas, tanto para variáveis de decisão quanto para regras operacionais. Muitas dessas alternativas não foram apresentadas por carecerem de interesse para os objetivos deste estudo, mas permitiram que a equipe de trabalho adquirisse a experiência adicional necessária para estabelecer as formulações que prevaleceram como critérios de operação recomendados.

A seguir são enumeradas as principais conclusões e recomendações que decorrem dos estudos acima apresentados.

Regras operacionais

Tanto os experimentos numéricos realizados com os modelos híbridos de simulação quanto com os modelos de otimização, mostraram, de forma

conclusiva, que a variável denominada “volume de alerta” é adequada como referência a partir da qual se deve praticar algum tipo de restrição no atendimento da demanda.

Já a variável denominada “alerta de bombeamento”, mesmo não tendo se evidenciado como variável de decisão apropriada em condições de futuro conhecido, apresentou bons desempenhos como variável de decisão nas simulações realizadas.

Como pode-se observar na figura 5 é evidente que os resultados obtidos nas simulações, mesmo sempre inferiores aos decorrentes da otimização, apresentam as mesmas tendências, evidenciando, a eficiência dos modelos híbridos de simulação em adotar valores da variáveis de decisão que permitem obter resultados que diferem muito pouco dos máximos possíveis de serem atingidos sob condições de futuro conhecido.

Ocorrência de ganhos sinérgicos decorrentes da adução de águas exógenas às bacias receptoras

Os experimentos numéricos executados permitem concluir que, tanto sob hipótese de futuro conhecido, quanto nas condições de operação real, existem ganhos sinérgicos importantes para todos os reservatórios pesquisados e que estes dependem das dimensões absolutas dos reservatórios, da variabilidade das vazões afluentes e, principalmente, da capacidade do operador em operar o reservatório da forma mais eficiente possível.

Com base no comportamento de reservatórios sujeitos a operação com vazão “firme”, isto é, com 100 de garantia, se aventou a hipótese de que o fenômeno denominado, neste artigo, como sinergia hídrica, era simplesmente um efeito indireto da simples constatação de que, para aumentar numa determinada quantia, uma vazão regularizada por um reservatório, só é necessário fornecer aquela quantia durante o que se denomina como “período crítico”; entendendo-se este, como o período entre vertimentos consecutivos, nos quais o reservatório não consegue atender a demanda preestabelecida.

Assim, a vazão regularizada, obtida sob condições de bombeamento de vazões exógenas, estaria representada pela seguinte soma aritmética:

$$Q_{r(\text{com_bombeamento})} = Q_{r(\text{sem_bombeamento})} + Q_{\text{transposta_nominal}} \quad (16)$$

onde o ganho sinérgico seria representado, exclusivamente, pela fração da vazão transposta nominal que não foi necessário bombear porque o reservatório dispunha do que podemos chamar de “águas secundárias”, em clara analogia com o conceito energia secundária, amplamente usado no setor elétrico.

Se isto fosse o que efetivamente aconteceria nos reservatórios estudados; mesmo assim, os estudos aqui desenvolvidos teriam apresentado importantes benefícios, mostrando que a simples utilização de duas variáveis de decisão: Volume de alerta e Alerta de bombeamento, inferidas mediante processos heurísticos, permitem desenvolver um modelo capaz de indicar decisões sobre quanto e quando bombear e quando restringir a oferta d’água dos reservatórios.

Não obstante, para garantias diferentes de 100%, a vazão regularizada sob condições de bombeamento de vazões exógenas, obtida mediante os modelos híbridos de simulação empregados, difere consideravelmente da soma da vazão regularizada sem bombeamento mais a vazão bombeada nominal, como podia-se supor, seguindo o raciocínio aplicado para vazões “fírmes”.

A figura 7 apresentam a diferença entre as vazões efetivamente obtidas operando os reservatórios e a soma aritmética acima descrita para os reservatórios de Orós e Armando Ribeiro Gonçalves. A diferença, para qualquer um dos reservatórios estudados, não é nula e adota valores positivos e negativos, variando segundo o valor da vazão transposta nominal.

Assim, pode-se concluir que, mesmo subtraindo o que pode-se denominar “efeito das águas secundárias”, ainda permanece uma parcela de sinergia hídrica remanescente que apresenta valores não desprezíveis, e que decorrem da efetiva diminuição dos vertimentos e da evaporação do espelho d’água dos reservatórios.

Por outro lado, os resultados obtidos, não guardam relação com as dimensões dos reservatórios (o reservatório de Armando Ribeiro Gonçalves e o de Orós são semelhantes em dimensões) e apresentam, provavelmente, correlação com a variabilidade das vazões afluentes.

Esta hipótese se fundamenta no fato de que o reservatório de Armando Ribeiro Gonçalves é o corpo receptor que apresenta maior interferência de reservatórios localizados a montante e, em consequência, as afluições recebidas apresentam maior variabilidade por estar constituídas, numa alta proporção, por vertimentos esporádicos de outros reservatórios.

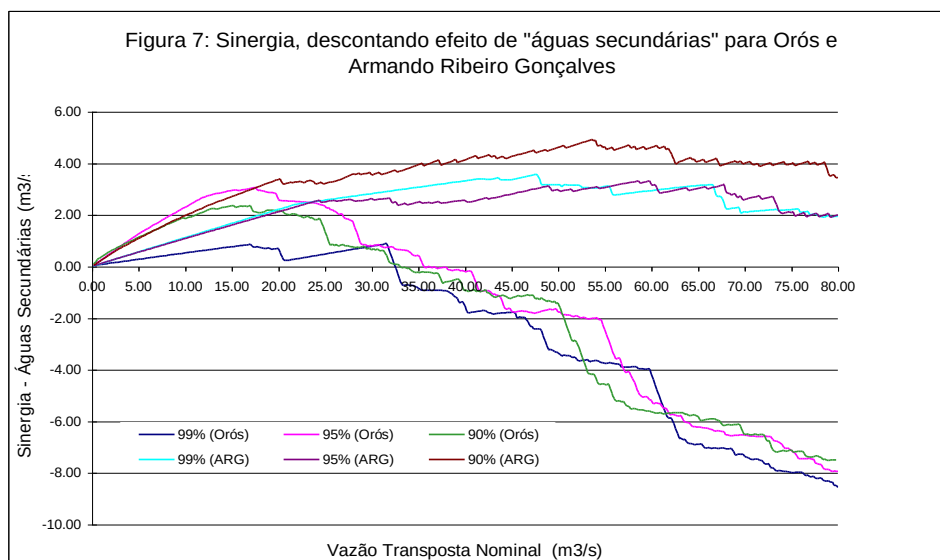
Comportamento dos ganhos sinérgicos

Os ganhos sinérgicos se apresentaram sempre crescentes em relação às vazões aduzidas, constituindo funções monótonas crescentes (ganhos totais) e funções monótonas decrescentes (ganhos marginais), não havendo evidências da ocorrência de pontos singulares (máximos ou mínimos), pelo menos para os intervalos de vazões estudados (0 – 80 m³/s), sendo que, mesmo para os reservatórios de menor porte pesquisados não foi constatada nenhuma assintoticidade que evidencie saturação total dos ganhos sinérgicos.

Minimização das perdas totais nos reservatórios

O critério de mínimas perdas totais nos reservatórios se evidenciou como uma função objetivo mais sensível e representativa do que a simples maximização da vazão regularizada, tanto para os modelos de otimização, quanto para os modelos híbridos de simulação.

Este critério apresenta curvas com concavidade / convexidade que permitiram identificar máximos ou mínimos locais e permite estabelecer recomendações para serem seguidas nos estudos relativos a análise econômico – financeira do empreendimento Transposição.



Operação integrada

Foi constatado que, quando ocorrerem cascatas de reservatórios, a melhor alternativa de operação dos mesmos implica na adução das vazões transpostas no reservatório localizado no extremo de montante do sistema, isto se evidencia mais fortemente sempre que a cascata se encontre associada a um único centro de demanda suscetível de ser atendido por todos os reservatórios. Se houver uma estrutura de demandas com forte dispersão espacial a operação integrada pouco contribuirá para a eficiência na operação. Os ganhos adicionais decorrentes da operação conjunta não foram tão representativos quanto se esperava, atribuindo-se este fato a que as melhorias obtidas previamente, com a adoção de variáveis de decisão consistentes, reduziram, consideravelmente, a margem disponível para melhoria da operação.

AGRADECIMENTOS E ESCLARECIMENTOS

Os autores agradecem à Secretaria de Políticas Regionais (SEPRE), à Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espacial (FUNCATE) e a VBA Consultores pela utilização de informações e recursos utilizados neste artigo. Toda e qualquer opinião emitida neste artigo é de exclusiva responsabilidade de seus autores, não representando opinião oficial das instituições citadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARKI CONSULTING AND DEVELOPMENT - “GAMS/CONOPT Model”, Arki Consulting and Development , Bagsvaerd, Dinamarca, 1996.
- BROOKE, A., KENDRICK D., MEERAUS A. - “ GAMS RELEASE 2.25 – A User’s Guide”, GAMS Development Corporation, Washington D.C. – USA, 1996.
- CAGNIN, J.U. - “Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco: Uma Nova Abordagem”, III Seminário de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador, BA, 1996.
- LANNA, A.E., SCHWARBACH, M. - “MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável”, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Porto Alegre, RS, 1988.
- MOLINAS P.A., SARMENTO F.J., CARDOSO E.F. - “Aspectos da Operação dos Reservatórios das Bacias Receptoras de Águas da Transposição do Rio São Francisco”, XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Recife, PE, 1995.
- MOLINAS P.A. - “Aspectos da Operação dos Reservatórios das Bacias Receptoras de Águas da Transposição do São Francisco”. Relatório Elaborado para a secretaria de Políticas Regionais, fortaleza-CE, 1996.
- SEPRE-SECRETARIA ESPECIAL DE POLÍTICAS REGIONAIS – FUNCATE - FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA, APLICAÇÕES E TECNOLOGIA ESPACIAL - “Termos de Referência ara a elaboração dos Estudos de Inserção Regional do Projeto de Transposição de Águas do rio São Francisco para o Nordeste Setentrional”, SEPRE-FUNCATE, Brasília, 1997.
- SARMENTO F.J., MOLINAS P.A., CARDOSO E.F. - “Wasserwirtschaftliche Aspekte der Überleitung vom Rio São Francisco im Nordosten Brasiliens“, Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 37, Blackwell Wissenschafts - Verlag, Berlin, 1996.
- SRH-CE – SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ - “Plano Estadual de Recursos Hídricos”, Fortaleza, CE, 1991.
- STANFORD UNIVERSITY - “MINOS 5.4 Model – User’s Guide”, Reeditado por Gams Development Corporation, Washington D.C. – USA, 1996.

