

## Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte

Antonio Marozzi Righetto e João Abner Guimarães Filho

LARHISA - Depto. Eng. Civil - Centro de Tecnologia - UFRN - Centro Universitário - Caixa Postal 1524  
59072-970 Natal, RN - righetto@ct.ufrn.br

Recebido: 11/01 - revisão: 06/02 - aceito: 04/03

### RESUMO

*Afirma-se que os açudes do nordeste setentrional são, em geral, operados de forma conservadora em vista da imprevisibilidade dos volumes afluentes dos próximos períodos chuvosos. Entretanto, caso seja garantida vazão firme afluente proveniente de transposição de águas entre bacias, supõe-se haja indução de sinergia hídrica, a qual exprime os ganhos em volume de água estocado. Este trabalho discute a possibilidade de se maximizar a utilização de águas represadas para irrigação quando se oferece através de fonte exógena garantia total de oferta hídrica ao abastecimento de água às populações urbanas e rurais. É apresentado um estudo preliminar da simulação operacional dos reservatórios Cruzeta e Armando Ribeiro Gonçalves, RN no sentido de verificar a magnitude de oferta hídrica destes reservatórios quando se dispõe de vazão firme proveniente de fonte exógena. Os resultados obtidos com o modelo de simulação da operação conjunta dos reservatórios Coremas/Mãe D'Água e Armando Ribeiro Gonçalves indicaram que, quando se considera o ganho médio ao longo de todo o período de simulação, a sinergia hídrica induzida por fonte exógena é da ordem de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para o açude Cruzeta, condicionando-se a oferta hídrica a um nível de garantia de 90%, obtém-se a elevação de  $5,20 \cdot 10^5$  para  $6,60 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{mês}$  no volume mensal para irrigação quando a água para o abastecimento humano é suprida por fonte exógena. No entanto, aceitando-se a variabilidade de oferta hídrica anual, é possível utilizar grandes volumes mensais para irrigação, chegando-se a valores de 2 milhões de metros cúbicos mensais.*

**Palavras-chave:** recursos hídricos superficiais.

### INTRODUÇÃO

Afirma-se que os açudes do nordeste setentrional são, em geral, operados de forma conservadora em vista da imprevisibilidade dos volumes d'água afluentes dos próximos períodos chuvosos. Com a possibilidade de ocorrer escassez de precipitação, os operadores são obrigados a utilizar mal as águas armazenadas nos açudes uma vez que os espelhos de água são mantidos, dentro do possível, nas maiores elevações, promovendo assim grandes perdas por evaporação durante as estiagens. Por outro lado, durante as cheias, com volumes de espera menores, grandes volumes de água são vertidos caso ocorram fortes e persistentes precipitações.

Entretanto, especula-se que se fosse garantida vazão firme afluente para atender as necessidades básicas de abastecimento de água, através de vazão exógena, proveniente, por exemplo, da transposição de águas entre bacias e utilização de outros mananciais, poder-se-ia induzir a sinergia hídrica no açude. Entende-se por sinergia hídrica de um reservatório o ganho em volume de água para o atendimento da demanda, devido à redução de perdas de água por evaporação e por vertimento. Supõe-se que, com a disponibilidade de água de fonte exógena, é possível operar de maneira menos conservadora o açude, utilizando-se dos volumes

de água armazenados sem a preocupação de seu esvaziamento e possível colapso para o abastecimento humano. Eliminada a preocupação em se reter água para atender a um possível período de severa estiagem, o espelho d'água pode ser rebaixado, reduzindo-se a área evaporante e aumentando-se o volume de espera para a acumulação de água durante os períodos de cheia.

Relatórios e documentos oficiais do governo enaltecem o mais recente Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco, coordenado pelo Ministério da Integração Nacional, em que destacam a indução de sinergia hídrica nos açudes como sendo o aspecto relevante do projeto, pois, com essa indução, multiplica-se a oferta hídrica da transposição pelo melhor uso das águas das bacias hidrográficas do nordeste setentrional armazenadas nos açudes (C.D., 1999 e VBA, 1999).

Molinas e Sarmento (1999) afirmaram que os açudes contemplados com fontes exógenas de suprimento hídrico podem ser muito melhor operados com ganhos consideráveis nas vazões regularizadas. Salientaram que os objetivos desejados no aproveitamento dos recursos hídricos de bacias receptoras de águas da transposição do rio São Francisco são de maximizar a oferta hídrica proveniente da infraestrutura hídrica local com o mínimo tempo de acionamento do sistema de bombeamento da transposição e de minimizar

as perdas por evaporação ou vertimento nos reservatórios locais, fazendo uso de vazões transpostas complementares de modo a obter o melhor rendimento possível.

Guimarães Jr. et al. (2000) apresentaram estudo sobre questões hídricas do Estado do Rio Grande do Norte e os possíveis reflexos da implantação do Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco (PTSF) sobre os recursos hídricos do Estado. Trata-se de um documento que levanta questões de ordem técnica, econômica e social e contesta o alcance do PTSF divulgado pelo Governo. Um dos pontos levantados se refere à sinergia hídrica. No entender dos autores, a sinergia hídrica não tem a magnitude esperada e anunciada pelo Governo, pelo menos com relação às condições atuais de oferta e demanda hídrica do Estado do Rio Grande do Norte.

Aparentemente, a divergência de posicionamento quanto à magnitude da sinergia hídrica está relacionada com as condições operacionais do sistema. Caso prevaleça o cenário da demanda hídrica requerida ser igual ou superior ao da oferta, a sinergia hídrica de fato pode ser significativa sem, no entanto, atingir valores tão elevados como os anunciados pelo Governo. Por outro lado, mantida a tendência atual, sem a ocorrência de uma agressiva competitividade de uso de áreas irrigadas, com a oferta hídrica bastante superior à demanda, a sinergia hídrica no principal reservatório do RN, o açude Armando Ribeiro Gonçalves, parece ser pouco significativa, de ordem equivalente ao que seria perdido por infiltração e evaporação ao longo do grande percurso percorrido pelas águas da transposição.

Pelo fato dos estudos realizados pelo Governo e por Molinas e Sarmiento (1999) não apresentarem em detalhes as premissas e dados considerados nas simulações do sistema integrado envolvendo vários açudes e, também, por não se ter evidenciado resultados que comprovem vantagens de sinergia hídrica em condições operacionais como as que prevalecem atualmente no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (ARG), parte deste trabalho apresenta estudo preliminar da simulação operacional do reservatório ARG no sentido de verificar a magnitude da sinergia hídrica deste reservatório, tomando-se diferentes cenários de demanda. Além dessa análise, procurou-se verificar a possibilidade de se ter ganhos sinérgicos em pequenos e médios açudes caso se disponha de fontes exógenas para o atendimento da demanda de abastecimento de água às comunidades da região. Como estudo de caso, foi analisado o açude Cruzeta, localizado na região semi-árida do Seridó do Estado do Rio Grande do Norte.

Foram realizadas simulações com um modelo de balanço hídrico, tomando-se o sistema integrado correspondente à bacia hidrográfica de contribuição dos reservatórios Coremas-Mãe D'Água e Armando Ribeiro Gonçalves. Para o açude Cruzeta foi tomada a bacia hidrográfica associada a este reservatório. Para os dois casos estudados foram utilizados modelos de transformação chuva-vazão tendo em vista

a precariedade de dados fluviométricos existentes, utilizando-se de parâmetros estabelecidos para a região semi-árida do nordeste brasileiro (Cadier, 1994).

## METODOLOGIA

Duas abordagens metodológicas foram adotadas para os estudos de sinergia hídrica, uma para o açude Armando Ribeiro Gonçalves e outro para o açude Cruzeta, RN. Essas metodologias são apresentadas em separado, a seguir.

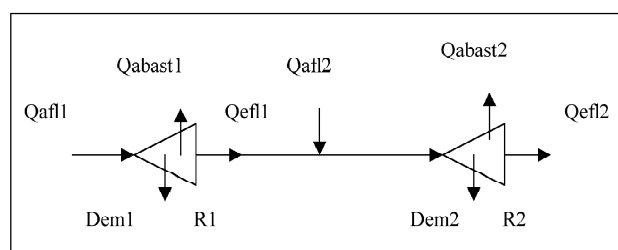
### Açude Armando Ribeiro Gonçalves

Pelo fato dos reservatórios Coremas-Mãe D'Água exercerem grande influência nas condições operacionais e de acumulação de água do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, decidiu-se por incluir no modelo de simulação os dois sistemas de acumulação de água e a operação conjunta desses reservatórios.

Infelizmente, a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu não dispõe de rede fluviométrica. Por essa razão não se pode esperar alta confiabilidade dos resultados absolutos obtidos pelo modelo, uma vez que se recorre a uma transformação simplista de precipitações mensais, baseada em estimativas grosseiras do coeficiente de *runoff*. No entanto, para os propósitos do presente estudo, os autores admitem que o modelo utilizado é satisfatório e é um instrumento adequado para a avaliação quantitativa da indução de sinergia hídrica em decorrência da garantia de volume afluente proveniente da transposição de águas do rio São Francisco. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do sistema integrado da bacia do rio Piranhas-Açu, com as principais variáveis envolvidas.

As vazões afluentes mensais aos reservatórios Coremas/Mãe D'Água,  $Q_{af1}$ , foram estimadas pelas precipitações médias mensais observadas nos postos pluviométricos da bacia contribuinte. O balanço hídrico conjunto desses dois reservatórios é realizado, levando-se em consideração as vazões mensais de demanda para o abastecimento humano  $Q_{abast1}$  e para a irrigação  $D_{em1}$ , as vazões mensais de vertimento  $Q_{vert}$  e de evaporação  $Q_{ev}$ , Molle (1989). Através das relações entre cota  $H_1$ , área  $Ares_1$  e volume  $V_1$ , realiza-se o balanço hídrico buscando-se encontrar a máxima eficiência em termos de vazões de demanda para irrigação  $D_{em1}$ , uma vez que é fixada uma vazão firme para o abastecimento humano, isto é,  $Q_{abast1} = cte$ . O mesmo procedimento é adotado para o balanço hídrico do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.

No entanto, convém ressaltar que, por se tratar de uma investigação prospectiva e preliminar da questão de ganho sinérgico, não foram consideradas as eventuais perdas ou ganhos por infiltração, nem tampouco foram consideradas



**Figura 1. Esquema do Sistema Hídrico Coremas-Mãe D'Água (R1) e Armando Ribeiro Gonçalves (R2).**

as derivações de vazões no trecho do rio Piranhas-Açu entre CMA e ARG.

Os dados utilizados para o balanço hídrico dos açudes Coremas/Mãe D'Água (CMA),  $i = 1$ , e Armando Ribeiro Gonçalves (ARG),  $i = 2$ , encontram-se na Tabela 1, tendo as variáveis as seguintes definições:

- $A_i$ : Área de drenagem da bacia hidrográfica do sistema de reservatórios;  $j = 1$ (CMA) e  $j = 2$ (ARG) em  $\text{km}^2$ .
- $P_i$ : Precipitação mensal sobre a área de drenagem  $A_i$  (mm).
- $C_i$ : Coeficiente de *runoff* correspondente a  $A_i$ .
- $Qafl_1$ : Vazão afluente mensal ao sistema CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qafl_2$ : Vazão contribuinte proveniente da bacia intermediária entre os reservatórios CMA e ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Ares_1$ : Área do espelho d'água em CMA, ( $\text{km}^2$ ).
- $Ares_2$ : Área do espelho d'água em ARG, ( $\text{km}^2$ ).
- $V_1$ : Volume d'água armazenado em CMA, ( $\text{m}^3$ ).
- $V_2$ : Volume d'água armazenado em ARG, ( $\text{m}^3$ ).
- $Qevap_1$ : vazão mensal evaporada em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qevap_2$ : vazão mensal evaporada em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qabast_1$ : vazão mensal para abastecimento humano em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qabast_2$ : vazão mensal para abastecimento humano em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qturb_1$ : vazão turbinada (projeto) em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Q_p$ : Vazão precipitada sobre o espelho d'água, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Dmax_1$ : Demanda mensal máxima requerida em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Dmax_2$ : Demanda mensal máxima requerida em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qtr_2$ : Vazão exógena, da transposição de águas do rio São Francisco, em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $D_1$ : Demanda média mensal alocada em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $D_2$ : Demanda média mensal alocada para irrigação em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Dreal_1$ : Demanda média mensal real em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Dreal_2$ : Demanda média mensal real em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qvert_1$ : vazão mensal de vertimento em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qvert_2$ : vazão mensal de vertimento em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qefl_1$ : vazão efluente em CMA, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Qefl_2$ : vazão efluente em ARG, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $Hres_1$ : Elevação do NA em CMA, (m).
- $Hres_2$ : Elevação do NA em ARG, (m).

**Tabela 1. Principais dados relativos aos açudes Coremas Mãe D'Água e Armando Ribeiro Gonçalves.**

Variável	CMA ( $i = 1$ )	ARG ( $i = 2$ )
$A_i$	7970	9530
$Qabast_i$	2,0	2,0
$Qturb_i$	6,0	-,-
$Hs_i$	245,00	55,00
$L_i$	150,0	225,0
$Halert_i$	231,00	37,00
$Hmin_i$	230,00	35,00
$Hmin,min_i$	212,00	25,00

- $Hs_1$ : elevação da soleira do vertedouro em CMA, (m).
- $Hs_2$ : elevação da soleira do vertedouro em ARG, (m).
- $L_1$ : Largura do vertedouro em CMA, (m).
- $L_2$ : Largura do vertedouro em ARG, (m).
- $Halert_1$ : Elevação de alerta do NA em CMA, (m).
- $Halert_2$ : Elevação de alerta do NA em ARG, (m).
- $Hmin_1$ : Elevação do NA mínimo, abaixo do qual é interrompida a liberação de água para irrigação e regularização em CMA, (m).
- $Hmin_2$ : Elevação do NA mínimo, abaixo do qual é interrompida a liberação de água para irrigação e regularização em ARG, (m).
- $Hmin,min_1$ : Elevação do NA *mínimo minimorum* abaixo do qual é interrompida a vazão para o abastecimento humano em CMA, (m).
- $Hmin,min_2$ : Elevação do NA *mínimo minimorum* abaixo do qual é interrompida a vazão para o abastecimento humano em ARG, (m).

As relações entre cota-área-volume ou  $Hres(m)-A(m^2)-V(m^3)$  em CMA e ARG foram expressas através das seguintes equações empíricas:

CMA

$$Ares_1 = 5253,781.(Hres_1 - 202)^{2,485718} + 210.(Hres_1 - 202)^{3,351252} \quad (1)$$

$$V_1 = 242,9808.(H_{res_1} - 202)^{3,932144} + 8909,98.(H_{res_1} - 202)^3 \quad (2)$$

ARG

$$Ares_2 = [-384,39947 + 29,86623.H_{res_2} + 0,00729.H_{res_2}^3].10^6 \quad (3)$$

$$V_2 = [-2964,57 + 257,36.H_{res_2} - 7,8.H_{res_2}^2 + 0,089054.H_{res_2}^3].10^6 \quad (4)$$

Os coeficientes de *runoff* para as transformações de chuvas mensais em vazões mensais foram estimados utilizando-se da seguinte relação empírica (CNEC, 1973):

$$C_i = 3,9839.P_{anual_i}^{-1} + 0,04023 - 2,8766.10^{-4}.P_{anual_i} + 5,32272.10^{-7}.P_{anual_i}^2 - 1,61967.10^{-10}.P_{anual_i}^3 \quad (5)$$

em que  $C_i$  é o coeficiente de *runoff* estimado para a bacia  $i$  em função da precipitação média anual.

As precipitações médias mensais excedentes na bacia de CMA e na intermediária de ARG foram então determinadas em função de  $C_i$  e das precipitações médias mensais  $P_{ij}$  de modo que a vazão média mensal afluenta a CMA e a vazão proveniente da bacia intermediária a ARG foram estimadas pelas expressões:

$$Q_{afl_{ij}} = 3,858.10^{-4}.C_i.A_i.P_{ij} \quad (6)$$

Na relação de  $C_i$  incluiu-se indiretamente e muito aproximadamente a detenção superficial da bacia contribuinte, correspondente aos milhares de pequenos e médios açudes existentes.

O equacionamento utilizado para a simulação do balanço hídrico nos reservatórios baseia-se na equação da continuidade e de vários condicionantes heurísticos relativos a regras operacionais. Pela subjetividade de aplicação de regras operacionais aos reservatórios obtêm-se resultados passíveis de tendenciosidades uma vez que as efetivas regras operacionais são incertas e altamente dependentes da cultura e experiência dos gestores de recursos hídricos desses corpos d'água. Por esse fato, os resultados das simulações serão necessariamente dependentes das premissas operacionais adotadas, o que torna indispensável a apresentação pormenorizada das hipóteses adotadas.

O balanço hídrico mensal no reservatório ARG é efetuado através da equação da continuidade, expressa por:

$$V_2^{j+1} = V_2^j + [Q_{tr_2}^j + Q_{p_2}^j + Q_{efl_1}^j + Q_{afl_2}^j - Q_{abast_2}^j - D_{real_2}^j - Q_{vert_2}^j - Q_{evap_2}^j].\Delta t \quad (7)$$

Para que o cálculo do balanço hídrico mensal não acarrete em erros grosseiros em vista da suposição de constância dos valores das vazões dentro de cada mês, o procedimento computacional é programado para se realizar o cálculo a nível diário de forma a se ter maior flexibilidade para o atendimento das restrições impostas e determinar com melhor precisão os valores de volume e nível d'água ao final de cada mês.

As restrições e regras operacionais adotadas no balanço hídrico deste estudo foram as seguintes:

1. Caso o NA esteja acima da soleira do vertedouro há vertimento, sendo a vazão calculada pela expressão:

$$Q_{vert_2}^j = 2.L_2.(H_{res_2}^j - H_{s_2})^{1,5} \quad (8)$$

2. Caso o NA esteja acima do nível de alerta, isto é,  $H_{res_2}^j > H_{alert_2}$ , não se utiliza vazão exógena, caso haja a disponibilidade desse recurso;
3. Caso o NA esteja abaixo do nível de alerta, isto é,  $H_{res_2}^j < H_{alert_2}$ , caso exista, é utilizada vazão exógena com valor progressivo até se atingir a máxima vazão quando o nível d'água atinge o NA mínimo, isto é,  $H_{res_2}^j = H_{min_2}$ .
4. Enquanto o NA estiver acima de  $H_{min,min_2}$  é garantida a vazão firme para o abastecimento humano;
5. A disponibilidade de demanda para irrigação é interrompida a partir do instante em que o NA passa a ficar abaixo do nível mínimo, isto é, quando  $H_{res_2} < H_{min_2}$ ;

## Demanda hídrica ao açude ARG

O aspecto de maior relevância no estudo do balanço hídrico e na avaliação do impacto da disponibilidade de vazões exógenas na operação e utilização dos estoques de água do reservatório é a caracterização e quantificação da demanda hídrica, isto é, a demanda hídrica requerida do açude e a disponibilidade de atendimento, quantificada pela demanda alocada e pela demanda real.

Entende-se por demanda hídrica requerida a máxima vazão de utilização caso o sistema pudesse atender integralmente todas as solicitações. A demanda hídrica alocada a nível mensal é especificada através de simulação, levando-se em consideração a aleatoriedade das vazões afluentes ao reservatório. Em geral, associa-se a demanda hídrica alocada a níveis de garantia. No presente estudo, as demandas mensais foram consideradas como fixas para todos os anos de simulação e obtidas por otimização. Finalmente, a demanda real mensal é a vazão mensal efetivamente fornecida e utilizada.

As simulações computacionais com otimização foram realizadas através de um algoritmo contendo os seguintes procedimentos:

1. Com os dados de precipitações médias mensais (60 anos de dados) nas bacias hidrográficas de CMA e ARG gerar as séries de vazões mensais  $Q_{afl_1}$  e  $Q_{afl_2}$ ;
2. Fixar as demandas hídricas mensais requeridas,  $D_{max_{ij}}$ ,  $j = 1, 2, \dots, 12$ .
3. Gerar aleatoriamente  $m_{cen}$  cenários de demandas mensais alocadas que comporão a população inicial de cenários. Cada cenário é constituído de 12 vazões mensais correspondentes aos valores de demandas mensais alocadas,  $D_{aloc_j}(k)$ ,  $j = 1, 2, \dots, 12$ ;  $k = 1, 2, \dots, m_{cen}$ ;

4. Fixar a vazão exógena máxima,  $Q_{tr}$  ou  $Q_{transp}$ ;
5. Para cada cenário  $k$  de demandas mensais alocadas realizar o balanço hídrico nos reservatórios CMA e ARG para a série de 60 anos de vazões afluentes  $Q_{afl_1}$  e  $Q_{afl_2}$ .
6. As simulações operacionais dos reservatórios associados a cada cenário resultam na obtenção de seqüências de vazões mensais evaporadas, vertidas e de demandas reais assim como dos níveis d'água dos reservatórios;
7. As demandas reais serão iguais ou inferiores às demandas alocadas uma vez que não há demanda para irrigação nos meses chuvosos e, dependendo dos níveis d'água dos reservatórios, ocorrerá interrupção de suprimento de água para irrigação nas situações em que o NA estiver abaixo do mínimo, isto é, quando  $H_{res_i} < H_{min}$ ;
8. Para cada cenário associa-se o valor da função-objetivo, escolhida para quantificar a demanda real média de todo o período simulado. A função-objetivo escolhida neste trabalho foi a seguinte:

$$F_{obj}(k) = \sum_{i=ano=1}^{60} \sum_{j=1}^{12} \sum_{id=1}^{30} [D_{real_{i,ano,j,id}}(k) - Q_{tr_{i,ano,j,id}}] / m_{irr} \quad (9)$$

em que  $m_{irr}$  é o número de dias com necessidade de suprimento de água para irrigação. O critério adotado para simular a necessidade de suprimento de água para irrigação foi a de ocorrência ou não de precipitação mensal acima de 50 mm. Nos meses em que a precipitação mensal é superior a 50 mm admite-se que não há a necessidade de fornecimento de água para irrigação.

O uso de um otimizador na simulação tem por objetivo determinar o cenário  $k^*$  em que  $F_{obj}$  é máximo, ou seja, qual a alocação de demandas mensais que maximiza o somatório das demandas mensais reais.

A introdução do termo correspondente à vazão mensal exógena,  $Q_{tr}$ , visa subtrair a utilização desta vazão de modo a obter o ganho sinérgico em relação à situação do sistema ser operado sem a fonte exógena. Dessa maneira, a Sinergia Hídrica,  $Sin_{hídr}$ , é definida pela diferença entre  $F_{obj}(k^*, Q_{tr} \neq 0)$  e  $F_{obj}(k, Q_{tr} = 0)$ , isto é:

$$Sin_{hídr}(Q_{transp}) = F_{obj}(k^*, Q_{tr}) - F_{obj}(k^*, 0) \quad (10)$$

O otimizador introduzido no modelo de simulação baseia-se nos algoritmos genéticos em que através de um processo de busca, vão sendo construídas seqüências populacionais de cenários, criando-se nova população a partir da seleção e cruzamento entre cenários da população atual e possível mutação de elementos dos novos cenários. For falta de espaço não será aqui detalhada a construção do algoritmo de otimização utilizado, mas o leitor interessado poderá consultar vasta literatura sobre o assunto, como por exemplo, em Goldberg (1989) e Halhal et al. (1997).

No algoritmo de otimização é fixado o número de cenários de cada população e o número máximo de populações a ser utilizado no processo heurístico de busca da solução "ótima". No presente estudo, foram utilizados 60 cenários em cada população, isto é,  $m_{cen} = 60$  e número máximo de gerações populacionais,  $m_{pop} = 100$ .

### Açude Cruzeta

O açude Cruzeta (RN) localiza-se na região semi-árida do Seridó. Tem capacidade de armazenamento de 29 hm<sup>3</sup>, bacia hidráulica de 750 ha e capta água de uma bacia hidrográfica com área de drenagem de 1020 km<sup>2</sup>. Foi projetado para possibilitar uma vazão de regularização anual de 0,174 m<sup>3</sup>/s (451.10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/mês). A cota do coroamento da barragem é igual a 85,00 m, a da soleira do vertedor de largura de 126 m igual a 83,00 m, a da tomada d'água igual a 74,00 m, do porão, 71,00 m. As relações entre cota  $h$  (em relação à cota do porão, em metros), área  $A$  (m<sup>2</sup>) e volume  $V$  (m<sup>3</sup>) do açude são dadas pelas seguintes expressões:

$$A = 33972,5 \cdot h^{2,177287} \quad (11)$$

$$V = 19171,37 \cdot h^{2,952036} \quad (12)$$

Pelo fato de não se dispor de série longa de vazões observadas do rio São José em Cruzeta, torna-se necessário o uso de modelo de transformação chuva-vazão para se obter séries sintéticas de vazões e realizar a análise operacional do reservatório.

O modelo de transformação chuva-vazão selecionado foi o utilizado pelo Consórcio CNEC/SOGREAH e apresentado em DNOCS (1973) no projeto do perímetro irrigado do açude Cruzeta, o qual, pela sua simplicidade e adequação, é apresentado, a seguir.

O modelo é baseado no balanço hídrico da superfície do solo e da capacidade de armazenamento de água da bacia. O balanço hídrico é mensal, tendo como dado principal a série de precipitações médias mensais sobre a bacia hidrográfica.

Para cada mês  $j$ , com o valor da precipitação mensal  $P_j$ , calcula-se a precipitação efetiva  $P_e$  pela expressão:

$$P_e = P_j - D \quad (13)$$

sendo  $D$  a detenção superficial (que quantifica todas as detensões superficiais da bacia inclusive os de açudagem), um dos parâmetros do modelo. Tem-se duas situações, isto é,  $P_e > 0$  e  $P_e < 0$ .

**Situação 1:  $P_e > 0$**  - Neste caso, é calculado o coeficiente de *runoff*,  $C$ , o deflúvio superficial direto,  $E_d$ , e o armazenamento de água na bacia,  $R_p$ , através das seguintes expressões:

$$C = C_{\min} + \frac{R_{j-1}}{R_j} (C_{\max} - C_{\min}) \quad (14)$$

$$E_1 = C.P_e \quad (15)$$

$$R'_j = R_{j-1} + (1 - C).P_e \quad (16)$$

Verifica-se se  $R'_j > R_{\max}$ . Em caso afirmativo, calcula-se o escoamento devido ao extravasamento da bacia,  $E_2$ , expresso por:

$$E_2 = (R'_j - R_{\max}).\xi \quad (17)$$

e neste caso, o armazenamento de água na bacia torna-se:

$$R_j = R_{\max} \quad (18)$$

No entanto, se  $R'_j < R_{\max}$  então não há escoamento por extravasamento, ou seja:

$$E_2 = 0 \quad (19)$$

e, neste caso:

$$R_j = R'_j \quad (20)$$

Nesta formulação, são introduzidos os seguintes parâmetros do modelo:  $C_{\max}$ ,  $C_{\min}$ ,  $R_{\max}$ , e o parâmetro  $\xi$  que representa a eficiência de transporte de água extravasada para o exutório da bacia. Evidentemente,  $C_{\min}$  e  $C_{\max}$  são os limites inferior e superior do coeficiente de *runoff* e  $R_{\max}$  a capacidade de armazenamento de água da bacia hidrográfica.

**Situação 2:  $P_e < 0$**  - Nesta situação não há deflúvio superficial e, tampouco, vazão de extravasamento, ou seja:

$$E_1 = 0 \quad (21)$$

$$E_2 = 0 \quad (22)$$

Neste caso, a lâmina d'água armazenada na bacia hidrográfica é diminuída devido às perdas de água, sendo estimada por:

$$R_j = R_{j-1} - |P_e| \frac{R_{j-1}}{R_{\max}} \quad (23)$$

Finalmente, o modelo calcula a vazão mensal  $Q_j$  através da seguinte expressão:

$$Q_j = A.(E_1 + E_2).b + (1 - b).Q_{j-1} \quad (24)$$

sendo  $0 < \beta < 1$  um parâmetro que leva em consideração o tempo de atraso de chegada da água no exutório da bacia hidrográfica.

Pela simplicidade do modelo, as etapas de calibração e de simulação hidrológica da bacia do rio São José no açude Cruzeta podem ser realizadas em planilha eletrônica, oferecendo o conforto de se analisar simultaneamente o ajuste dos valores gerados com os observados, a sensibilidade de cada parâmetro do modelo e demais resultados da simulação, como valores médios, rendimento da bacia etc.

Com as séries de vazões sintéticas geradas pelo modelo, a etapa seguinte consiste na análise de regras operacionais para o açude Cruzeta. Nessa análise, pode-se direcionar o estudo para a obtenção de um planejamento operacional anual ou plurianual, impondo-se ou não certos níveis de garantia para o atendimento de demandas para o abastecimento humano e para a irrigação.

Neste estudo, a análise operacional do açude Cruzeta teve por objetivo alcançar resultados que sinalizassem os ganhos sinérgicos que seriam obtidos caso se dispusesse de fontes alternativas para o suprimento de água para a população local.

Para isso, as simulações da operação do açude Cruzeta foram realizadas com alternativas de oferta hídrica diferentes, descritas a seguir.

No caso da operação do açude destinar-se ao abastecimento d'água à população e à irrigação, foram estabelecidos como critério operacional níveis distintos de garantia para o atendimento ao abastecimento humano e à irrigação. Fixou-se o nível de garantia de 99% para o abastecimento humano e de 90% para a irrigação. Com as de séries sintéticas de vazões afluentes e com a fixação do valor da demanda para o abastecimento público e realizando simulação operacional do reservatório, foi determinada a vazão regularizada para irrigação associada ao nível de garantia de 90%.

Em seguida, admitiu-se a existência de garantia plena de água para o abastecimento humano através de fonte exógena e, neste caso, desconsiderou-se essa demanda na operação do reservatório Cruzeta. Para este caso, a água represada no açude destina-se exclusivamente à irrigação. A busca de uma operação ótima objetiva a obtenção da máxima produção e minimização de perdas de água por evaporação e por vertimento. Como critério de utilização da água represada foram analisadas duas situações operacionais; uma com horizonte operativo plurianual com o estabelecimento de nível de garantia de oferta hídrica e outra, de utilização máxima do recurso hídrico disponível no açude, dentro de um período máximo de 20 meses.

## RESULTADOS

### Açude Armando Ribeiro Gonçalves

Grande quantidade de resultados foi obtida com as várias simulações realizadas, considerando diversos valores de  $Q_{\text{transp}}$  e de  $D_{\text{max}}$ . As Figuras 2 e 3 mostram

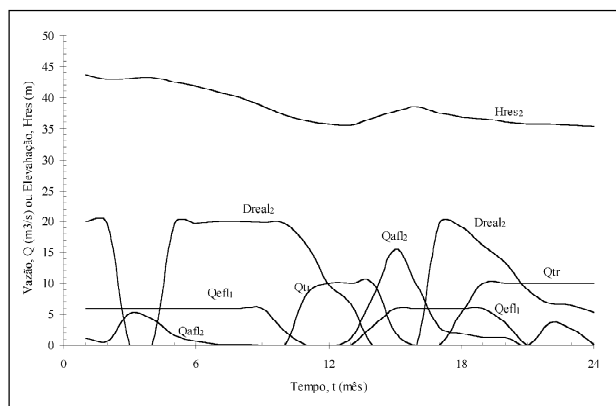


Figura 2. Vazões e níveis d'água simulados do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves em período normal com águas de transposição.

valores mensais típicos de Hres2, Qafl1, Qafl2, Qreal e Qtransp. Verifica-se nessa figura que para o período normal de dois anos, o NA do reservatório mantém-se mais elevado quando não se dispõe de vazão exógena do que quando ela é utilizada para operar o sistema uma vez que no início desse período, o nível d'água para a simulação em que  $Q_{transp} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$  era maior do que para a condição com  $Q_{transp} = 0$ . Com a oferta hídrica da transposição, utiliza-se de  $Q_{transp}$  nos últimos meses do primeiro ano e início do segundo ano, período em que o NA encontra-se abaixo do nível de alerta.

A Figura 4 apresenta a demanda media real alocada para irrigação em função da demanda máxima requerida para as situações em que  $Q_{transp} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$  e sem a disponibilidade de vazão exógena. A diferença entre as demandas reais com e sem a vazão de transposição fornece a sinergia hídrica, denominada Sin\_hidr. Verifica-se que a sinergia hídrica induzida por  $Q_{transp}$  cresce em função de  $D_{max}$  o que reforça o argumento de que os ganhos sinérgicos passam a ser apreciáveis quando a demanda requerida torna-se superior à oferta hídrica. Mantida a tendência atual de crescimento de água para irrigação, com demanda máxima de irrigação em torno de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , a sinergia hídrica é insignificante ou inexistente, como mostra a Figura 4.

A Figura 5 fornece valores da demanda real obtida pela determinação otimizada das demandas alocadas em função do valor do valor máxima de  $Q_{transp}$ . Verifica-se que o ganho sinérgico máximo é da ordem de  $3 \text{ m}^2/\text{s}$  (média ao longo dos 60 anos de simulação) para  $Q_{transp} = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , com tendência assintótica ao valor de  $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$  para valores crescentes de  $Q_{transp}$ .

As Figuras 6 e 7 mostram os valores simulados das vazões médias anuais de evaporação e de vertimento, com e sem vazão exógena. Esses valores foram obtidos para o caso em que a demanda máxima requerida,  $D_{max} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q_{transp} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

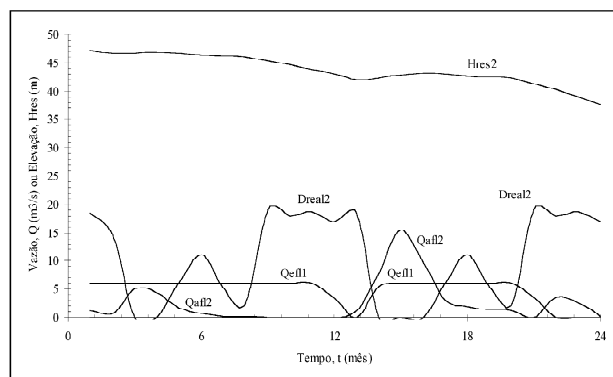


Figura 3. Vazões e níveis d'água simulados no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves em período normal sem águas de transposição.

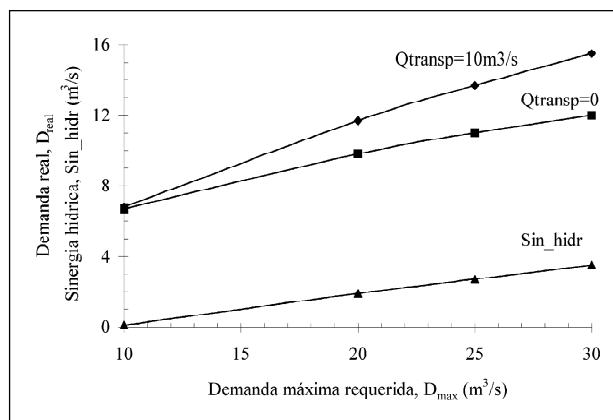


Figura 4. Demanda real, Dreal e sinergia hídrica, Sin\_hidr versus  $D_{max}$

Com relação às vazões de vertimento, verifica-se para as condições apresentadas do algoritmo de simulação, observam-se sete períodos com ocorrência de extravasamento do reservatório, não se observando grandes diferenças entre as simulações com e sem a introdução de vazões exógenas. De fato, há certo ganho sinérgico induzido pela maior regularização do reservatório devido a  $Q_{transp}$ . Entretanto, no âmbito global, considerando todo o período simulado de 60 anos, esse ganho torna-se bastante diluído e, por conseguinte, não se pode afirmar que haveria algum ganho apreciável na operação real do reservatório, principalmente, tendo em vista outras perdas relativas à própria condução das águas da transposição.

No entanto, a surpresa maior de resultados fica por conta do suposto ganho sinérgico decorrente da diminuição da água evaporada. Comparando-se as vazões evaporadas do sistema com e sem vazão exógena, surpreendentemente verifica-se que a vazão média anual de evaporação é maior quando se agrega ao sistema a vazão de transposição do que quando não se dispõe desse reforço hídrico.

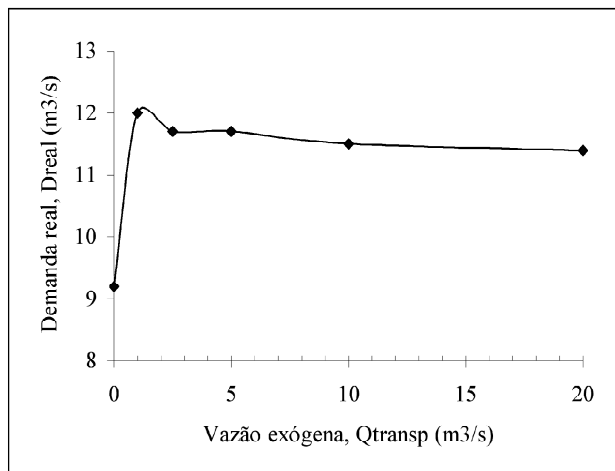


Figura 5. Demanda real,  $D_{real}$  versus vazão exógena,  $Q_{transp}$  com  $D_{max} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A interpretação para esse fato é de ordem operacional, e facilmente entendida quando se analisa o comportamento do reservatório com relação aos níveis d'água mínimo e de alerta. Enquanto o nível d'água estiver acima do nível de alerta o reservatório supre a demanda de água para irrigação além da de abastecimento, sem que seja preciso utilizar-se de vazão exógena. Atingido o nível de alerta, passa-se a reduzir proporcionalmente a vazão liberada para irrigação até a completa interrupção de suprimento de água para irrigação caso o nível d'água atinja o nível mínimo.

Abaixo do nível d'água mínimo apenas é garantida água para abastecimento.

Dispondo-se de vazão exógena, esta é utilizada a partir do instante que o NA chega ao nível de alerta. Abaixo desse nível, a vazão de transposição é mantida a fim de permitir a manutenção de suprimento de água para a irrigação. Nessa operação, procura-se manter o NA próximo do nível de alerta de modo a suprir a demanda alocada pelo sistema.

Comparando-se as situações operacionais com e sem a vazão de transposição verifica-se claramente que a operação com a transposição tende a manter o nível d'água mais elevado resultando, portanto, em espelho d'água maior e, portanto, maior taxa de evaporação.

Poder-se-ia argumentar que a análise realizada não contemplou aspectos operacionais importantes de garantia de oferta hídrica, pois o mercado de águas e o próprio desenvolvimento agrícola dependem do grau de incerteza quanto à disponibilidade de água para a irrigação ao longo dos ciclos das culturas.

Certamente foi considerado nas simulações um alto nível de garantia para o abastecimento humano, uma vez que a otimização das alocações de demandas mensais para a irrigação busca a solução em que, absolutamente, não ocorra comprometimento de água para o abastecimento em qualquer dos anos simulados. Por essa razão, pode-se afirmar

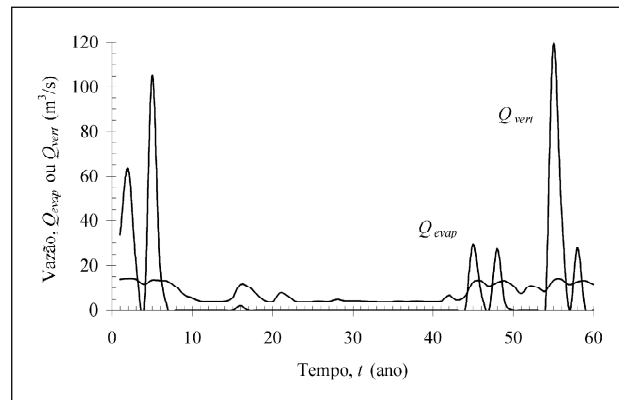


Figura 6. Vazões médias anuais evaporadas e vertidas,  $Q_{transp} = 0$ .

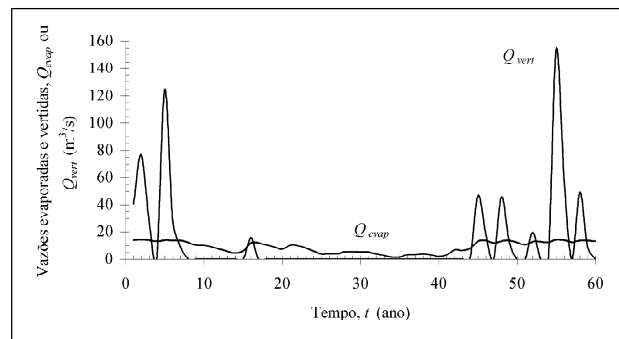


Figura 7. Vazões médias anuais evaporadas e vertidas,  $Q_{transp} = 0$ .

que o nível de garantia para o abastecimento humano é próximo de 100%.

Já para fins de irrigação, não se pode operar economicamente o reservatório com regularização plurianual de forma a atender determinados níveis de garantia para o suprimento de demanda para irrigação. Mesmo em sistemas bem controlados e gerenciados a operação é realizada em tempo real, buscando-se a maximização dos benefícios. Portanto, a imprevisibilidade de suprimento de água para irrigação dependerá essencialmente da magnitude da demanda máxima requerida e esta, sim, será o fator determinante para se decidir quanto à introdução de fonte exógena no sistema hídrico.

Já para fins de irrigação, não se pode operar economicamente o reservatório com regularização plurianual de forma a atender determinados níveis de garantia para o suprimento de demanda para irrigação. Mesmo em sistemas bem controlados e gerenciados a operação é realizada em tempo real, buscando-se a maximização dos benefícios. Portanto, a imprevisibilidade de suprimento de água para irrigação dependerá essencialmente da magnitude da demanda máxima requerida e esta, sim, será o fator determinante para se decidir quanto à introdução de fonte exógena no sistema hídrico.



## Açude Cruzeta

O modelo de transformação chuva-vazão apresentado anteriormente e utilizado na modelagem da Bacia Hidrográfica do rio São José em Cruzeta, RN, pode ser facilmente programado em planilha eletrônica Microsoft EXCEL. Através do uso da rotina SOLVER, os parâmetros do modelo podem ser calibrados de forma a reproduzir as vazões observadas.

A Figura 8 mostra o ajuste alcançado, tomando-se como “vazões observadas” uma série reconstruída a partir do balanço hídrico do açude Cruzeta, tendo como base às leituras diárias de réguas efetivadas pelo DNOCS. Nesse ajuste, foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros do modelo:  $C_{\min} = 0,03$ ;  $C_{\max} = 0,12$ ;  $D = 45,8$  mm;  $R_{\max} = 242$  mm;  $\xi = 0,2$ ;  $\beta = 0$ .

A Figura 9 apresenta curvas associadas a níveis de garantia para o abastecimento d'água e para a irrigação em função de alguns valores mínimos do NA, cada um definindo um limite, abaixo do qual não é permitida a retirada de água para a irrigação. As curvas foram obtidas por simulação da operação do açude Cruzeta seguindo a metodologia descrita anteriormente. Nessa figura, estão traçadas as curvas que relacionam o volume de consumo para irrigação com valores de NA mínimo (76,0; 76,5; 77,0 e 78,0 m) e níveis de garantia para a irrigação e para o abastecimento humano. A demanda para o abastecimento humano foi tomada como constante e igual a  $53.600 \text{ m}^3/\text{mês}$ .

Por exemplo, para um consumo de  $520.10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$  para irrigação e NA mínimo igual a 77,0 m, verifica-se pela Figura 9 que os níveis de garantia para o abastecimento humano e para irrigação são, respectivamente, iguais a 96% e 90%. No entanto, se o abastecimento d'água à população da cidade de Cruzeta for suprido por fonte exógena, a restrição do NA mínimo para irrigação passa a ser a da cota 76,0 m, ou seja, a cota do porão. Neste caso, mantendo-se o nível de garantia de 90%, verifica-se que a vazão de derivação para irrigação passa a ser de  $660.10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$ . A diferença entre esse valor e a soma  $(520 + 53,6).10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$  corresponde ao ganho sinérgico decorrente da redução de perdas por evaporação e por vertimento, uma vez que o açude é operado em média com níveis d'água abaixo daqueles quando água do açude é utilizada também para o abastecimento humano.

Uma segunda alternativa operacional do açude Cruzeta estudada diz respeito à utilização da água disponível no açude para um horizonte de 20 meses. Determina-se a vazão mensal firme a ser derivada para a irrigação com a suposição pessimista de não ocorrência de vazão afluyente nos próximos 20 meses a partir do término do período chuvoso atual.

Como se trata de uma situação de operação em tempo real, eventuais aflúncias ao longo do período seco e do próximo período chuvoso seriam consideradas e novo valor de vazão mensal para irrigação seria estabelecido após o término do próximo período úmido.

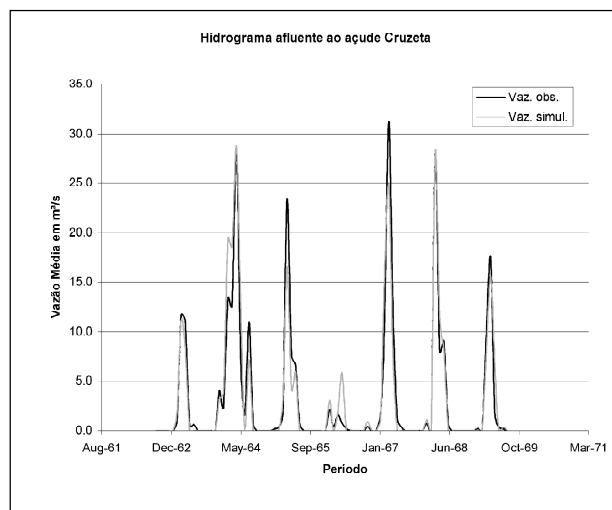


Figura 8. Calibração do modelo chuva-vazão para o açude Cruzeta.

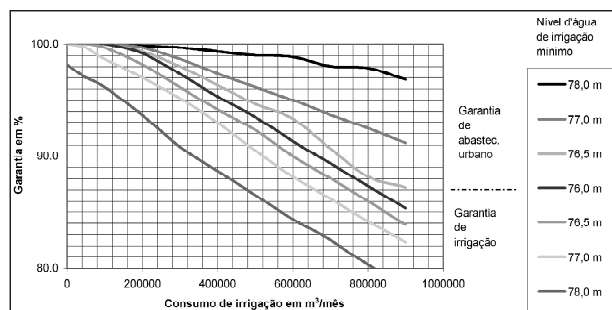


Figura 9. Curvas de garantia do açude Cruzeta.

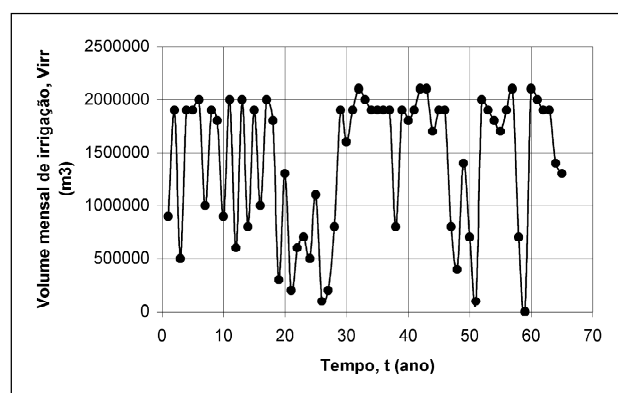
Com essa estratégia operacional, foram simulados diversos cenários de vazões de aflúncia e determinadas as vazões de utilização correspondentes para irrigação.

A Figura 10 apresenta a seqüência de volumes mensais para irrigação obtida por simulação computacional, através do balanço hídrico mensal do açude Cruzeta.

Os valores encontrados mostram que é possível explorar a água represada no açude de maneira muito mais intensa do que a determinada pela fixação do nível de garantia de oferta hídrica. Evidentemente, nessa liberação de água baseada na garantia de água para um horizonte de 20 meses envolve riscos e flutuações de produção decorrentes da indesejável, mas necessária variabilidade anual do volume mensal de água para irrigação.

No entanto, deve-se enfatizar que a garantia de oferta hídrica a um nível de garantia de 90% significa conviver com perdas contínuas de grandes volumes de água por evaporação e esporadicamente por vertimento, situação muitas vezes desastrosa numa região com gravíssimos bolsões de pobreza.

Enquanto a garantia de oferta hídrica propicia os investimentos de capital privado na agricultura irrigada e, conseqüentemente, no mercado de exportação de produtos agrícolas, por outro lado, a utilização intensa da água represada,



**Figura 10. Seqüência simulada de volumes mensais para irrigação do açude Cruzeta, RN**

apesar dos riscos envolvidos, significa em ações de transferência de água armazenada em estoques de produtos, de vital importância a um programa sustentável de combate à pobreza no semi-árido do nordeste do Brasil.

Os valores de volumes mensais para irrigação apresentados na Figura 10 revelam a capacidade potencial existente do açude para a produção agrícola em larga escala caso se disponibilize de infraestrutura adequada e de políticas públicas eficazes de combate à fome. Evidentemente, a questão não se resume, apenas, à gestão hídrica, mas a um conjunto de ações envolvendo a estocagem de produtos, desenvolvimento de infraestrutura agrícola, treinamento, investimentos, relações eficazes de mercado etc.

Na Figura 10, verifica-se que a pior situação de oferta hídrica é a do ano 59. No entanto, mesmo para essa pior situação histórica, verifica-se que no ano 57 a liberação de água para irrigação foi de 2 milhões de metros cúbicos mensais e no ano 58, 700.000 m<sup>3</sup>/mês. Conclui-se, portanto, que se tais volumes fossem convertidos em produtos, certamente o ano crítico seria compensado pelas reservas alimentícias acumuladas nos anos anteriores.

## CONCLUSÕES

Os resultados das simulações realizadas neste estudo revelam que um melhor aproveitamento dos volumes d'água armazenados no açude Armando Ribeiro Gonçalves é conseguido quando se dispõe de vazão exógena garantida e a demanda é significativa, igualando-se ou superando a vazão regularizada de longo período. Com a diferenciação das demandas reais para irrigação e para o abastecimento e a atribuição de valores distintos para a demanda máxima requerida, para a demanda alocada e para a demanda real, foram avaliados os ganhos sinérgicos de longo período no açude Armando Ribeiro Gonçalves.

Os resultados preliminares obtidos com o modelo de simulação da operação conjunta dos reservatórios Coremas/Mãe D'Água indicaram que, para a atual tendência de cres-

cimento da demanda, quando se considera o ganho médio ao longo de todo o período de simulação, a sinergia hídrica induzida por fonte exógena é de pequena magnitude, com valor máximo em torno de 3 m<sup>3</sup>/s, equivalente às estimativas de perda d'água por condução ao longo do curso d'água.

A sinergia hídrica pode se tornar significativa quando o cenário de demanda requerida para irrigação torna-se superior à oferta hídrica. Neste caso, que reflete extraordinário desenvolvimento da agricultura irrigada no vale do Baixo Açu, a introdução de fonte exógena seria recomendada, pois, do ponto de vista sócio-econômico se justificaria criar condições para que a demanda requerida fosse atendida com nível de garantia elevado.

Quanto ao aproveitamento do açude Cruzeta, tomado como representativo da região semi-árida do sertão do Estado do Rio Grande do Norte, a operação do açude pode ser muito melhorada, caso se viabilize a garantia de oferta hídrica ao abastecimento de água à população através de fonte exógena, por meio de adutoras. Para um nível de garantia de 90%, consegue-se elevar em 50% a oferta hídrica para a irrigação.

Uma outra alternativa de utilização da água armazenada no açude Cruzeta foi testada, baseada no máximo aproveitamento da água disponível ao final de cada período chuvoso. É uma alternativa que visa transformar estoque de água em estoque de produto de forma a se maximizar a produção nos anos em que se dispõe de volumes de água e redução ou mesmo desativação da produção nos períodos secos extremos. Trata-se de uma alternativa que visa a auto-sustentabilidade de produção de alimentos, dentro de um programa social abrangente de combate a fome, em que se garantiria o encadeamento da produção com a estocagem de produtos, distribuição de alimentos, geração de renda, gestão dinâmica dos assentamentos agrícolas, manutenção e ampliação da infraestrutura hídrica etc.

Nessa alternativa de maximização de utilização da água retida no açude Cruzeta, as simulações mostraram que é possível elevar a oferta hídrica mensal para irrigação a valores de até 2.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/mês, da ordem de 4 vezes o atual volume regularizado para irrigação.

Com relação à utilização do modelo de transformação chuva-vazão para obtenção de séries sintéticas de vazões mensais, o modelo apresentado e utilizado para a bacia receptora das águas afluentes ao açude Cruzeta demonstrou eficiência elevada no ajuste das vazões simuladas com as observadas, facilidade de obtenção dos valores calibrados dos parâmetros do modelo e simplicidade de uso através de planilha eletrônica.

## REFERÊNCIAS

- CADIER, E. (1994). *Hidrologia das pequenas bacias do nordeste semi-árido*. Série Hidrol./31, Sudene. 476 p.
- C.D. - CÂMARA DOS DEPUTADOS (1999). *Seca: o homem como ponto de partida: análise, pressupostos, diretrizes, projetos e metas de uma política de convivência com a seca do nordeste*. Brasília. 166 p.
- CNEC (1973). *Aproveitamentos Hidro-agrícolas dos Açudes de Itans, Sabugi, Cruzeta e Paus dos Ferros, RN - Estudos Hidrológicos, Relatório Técnico*: 97 p.
- DNOCS (1973). *Aproveitamento hidro-agrícolas dos açudes de Itans, Sabugi, Cruzeta e Pau dos Ferros, RN. Estudos Hidrológicos, Consórcio CNEC/SOGREAH*. 97 p.
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Reading, Mass. 412 p.
- GUIMARÃES JUNIOR, J. A.; CRUZ, R. P.; RIGHETTO, A. M.; MATTOS, A.; LUCAS, FILHO, M.; GOMES, R. C. C.; SILVA, S. M. P.; SILVA, A. G.; SILVA, D. A.; COSTA, F. B. e SILVA, D. A. (2000). A Transposição do rio São Francisco e o RN. In: *Rio Grande do Norte - Ética e Desenvolvimento*, UFRN. Natal, p. 331-340.
- GUIMARÃES JUNIOR, J. A.; MELO, J. M. B. G. e RIGHETTO, A. M. (2000). *Curvas de garantia para operação com fins múltiplos do açude Cruzeta, RN*. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Natal, RN. Vol. 2, p. 656-670.
- HALHAL, D., WALTERS, G. A., OUAZAR, D. & SAVIC, D. A. (1997). Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of. Water Resources Planning and Management*, 123(3), p. 137-145.
- MOLINAS, P. A. e SARMENTO, F. J. (1999). *A operação dos reservatórios sujeitos a transposição de águas - estudo de casos dos reservatórios das bacias receptoras das águas da transposição do rio São Francisco*. Trabalho 218, XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte. 24 p.
- MOLLE, F. (1989). *Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes*. Série Hidrológica/25, SUDENE, Recife. 175 p.
- VBA (1999). *VBA Consultores - Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco*. Ministério da Integração Nacional.

### *Optimal Use of Superficial Water Resources of Rio Grande do Norte State, Brazil*

#### **ABSTRACT**

Brazilian government specialists claim that the existing reservoirs in the semi-arid region are operated very conservatively because of the uncertainties of water volume inputs during the following rainy periods. However, it is assumed that by transposing water between water basins it is possible to get synergetic effects, with substantial water gains due to the reduction of water losses to evaporation and spillage. This paper presents simulations and discussions of increasing water volumes for irrigation when there is a guaranteed water supply for the population from exogenous sources through pipeline flow systems. A preliminary simulation of the operation of Armando Ribeiro Gonçalves and Cruzeta reservoirs is presented in order to verify the magnitude of water delivery for irrigated areas with specified guaranteed levels. Simulations of the Coremas/Mãe D'Água and Armando Ribeiro Gonçalves reservoir systems showed that the synergetic effects over a long period are on the order of  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  for the current tendencies of the Baixo Açu irrigated area project development. Simulations of the Cruzeta reservoir, a typical medium-sized reservoir in the semiarid region of the state of Rio Grande do Norte showed that it is possible to increase irrigation water volume from  $5.20 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{month}$  to  $6.60 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{month}$  for a 90% guaranteed level if water for the population was supplied by an exogenous source through a pipeline system. Moreover, accepting the annual variation of water volume for irrigation it is possible to maximize the use of the storage water converting it to agricultural products so that a maximum water volume of  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{month}$  could be used in rainy years.

Key words: superficial water resources.