

Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos: II Aplicação

Valterlin da Silva Santos, Wilson Fadlo Curi, Rosires Catão Curi, Allan Sarmento Vieira

Grupo de Otimização Total da Água – GOTA/UFCC

vallerlin@yahoo.com.br, wfcuri@yahoo.com.br, rosirescuri@yahoo.com.br, allansarmento@yahoo.com.br

Recebido: 14/01/10 - revisado: 27/05/10 - aceito: 26/08/11

RESUMO

O presente trabalho trata da aplicação de um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em Programação Linear Sequencial, a um sistema constituído de dois reservatórios, ligados em série, e um perímetro irrigado de 500 ha situados no sertão do estado da Paraíba. As demandas hídricas consideradas dizem respeito ao abastecimento humano nas cidades, irrigação e perenização do rio a jusante dos reservatórios. Para a operação do sistema foram considerados os seguintes objetivos: atendimento das demandas destinadas ao abastecimento urbano, da vazão destinada a perenização do rio e do volume meta dos reservatórios, assim como, a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da atividade agrícola. Foram idealizados cenários, variando as prioridades de atendimentos dos objetivos, com o intuito de avaliar a resposta do modelo quanto à consistência dos resultados e ao tempo de processamento. Os resultados mostraram que os objetivos são atendidos considerando as prioridades de atendimento pré-estabelecidas (comprovando que o modelo efetua uma análise multiobjetivo) e com as restrições físicas dos componentes do sistema. O tempo de processamento e o tempo de processamento computacional para a obtenção da solução ótima foi considerado satisfatório (19 segundos e 5 iterações, em média, para resolver um problema de 3.802 variáveis de decisão e 874 equações de restrições, quando considerado 9 anos de operação). Os resultados obtidos para a operação do sistema podem servir como subsídio na geração de regras operacionais para a alocação da água atendendo as demandas, os objetivos e as restrições físicas estabelecidas.

Palavras – chave: Recursos hídricos, otimização, programação linear, linearização.

INTRODUÇÃO

Em regiões semi-áridas, como o Nordeste brasileiro, um dos grandes problemas é o atendimento da população com água de boa qualidade, alimento e emprego. Essas regiões apresentam características climáticas bem definidas, como altas taxas de evaporação, chuvas bastante irregulares a nível espaço-temporal e baixos índices pluviométricos, quando comparado com o resto do Brasil, condicionando o desenvolvimento socioeconômico da região (Vieira, 1996).

O planejamento do uso das águas dos mananciais existentes pode proporcionar um melhor aproveitamento, controle e conservação de suas águas, porém, o grande desafio deste planejamento está em ser capaz de atender as demandas dos múltiplos usos de forma integrada e otimizada para todo o sistema. A sustentabilidade hídrica do sistema depende deste planejamento integrado eficiente e racional da alocação das disponibilidades hídricas entre os seus múltiplos usos. Métodos de otimização

estão entre os instrumentos mais apropriados para efetuar tais análises.

No artigo anterior foi apresentado um modelo de otimização, baseado em Programação Linear Sequencial, para ser uma ferramenta que visa o estudo da alocação ótima das disponibilidades hídricas entre os múltiplos usos de sistemas de recursos hídricos, quando operados de forma integrada, via uma análise multiobjetivo.

O objetivo deste trabalho é aplicar este modelo a um sistema de recursos hídricos verificando sua adequação para aplicações práticas (facilidade no uso, tempo de processamento, etc), avaliando as alterações na resposta quanto às mudanças de prioridade de atendimento dos objetivos.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O modelo foi aplicado na sub-bacia do riacho Santana, afluente do rio Piancó, localizado no sudoeste do estado da Paraíba entre as latitudes

7°30' e 7°51' Sul e as longitudes 38°7' e 38° 22' Oeste (Figura 1). A sub-bacia apresenta dois reservatórios em série, denominados Catolé I e Poço Redondo e um perímetro irrigado, em implantação a jusante do reservatório Poço Redondo. As principais aglomerações urbanas são as cidades de Manaíra e Santana de Mangueira.

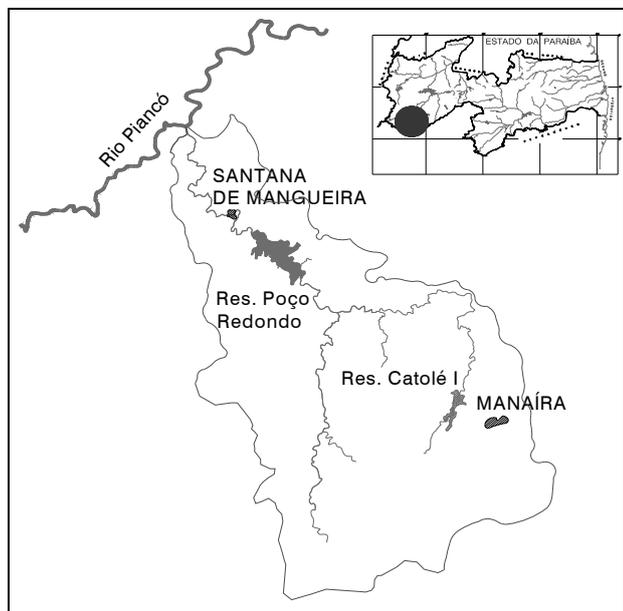


Figura 1 – Sub-bacia do riacho Santana.

A referida sub-bacia apresenta aspectos climáticos, segundo a classificação de Köppen, do tipo Awig, - clima tropical úmido, com chuvas de verão-outono, influenciado pela Frente de Convergência Intertropical -. A temperatura média anual é superior a 27 °C com uma amplitude térmica de 4 °C. A umidade relativa do ar varia de 56% a 74%. A precipitação média anual é de cerca 900 mm com evaporação anual de cerca de 3.000 mm. O relevo é ondulado com altitudes variando entre 400 e 800 m. Os tipos de solo predominantemente encontrados são, em ordem de abrangência, (SCIENTEC, 1997): Litossolos Eutróficos, Podzólicos Vermelho, Amarelo Eutróficos e Cambissolos Eutróficos Latossólico. A vegetação natural é do tipo xerófito, pertencente ao bioma caatinga.

DADOS DO SISTEMA

Evaporação

Para a estimativa da evaporação nos reservatórios e da evapotranspiração do perímetro irrigado

foram utilizados dados observados do tanque “Classe A” do posto Climatológico de Coremas. Os valores mensais do coeficiente de tanque kt foram estimados por Oliveira et al. (2005) para a região do sertão paraibano (mais precisamente na cidade de Patos). Os dados de evaporação média mensal e do coeficiente tanque kt podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente kt.

	Evap. (mm)	kt
Jan	272,3	0,77
Fev	215,4	0,79
Mar	204,1	0,78
Abr	182,4	0,92
Mai	183,1	0,93
Jun	182,2	0,91
Jul	219,9	0,80
Ago	271,9	0,81
Set	299,6	0,77
Out	332,9	0,78
Nov	319,0	0,76
Dez	310,6	0,76

Precipitação

Para o cálculo da precipitação foram utilizados valores dos postos pluviométricos (Tabela 2) mais próximos dos reservatórios e o perímetro irrigado.

Tabela 2 – Postos pluviométricos utilizados.

	Posto Utilizado	
	Nome	Código
Res. Catolé I	Manaíra	3853467
Res. Poço Redondo	Ibiara	3843919
Perímetro Irrigado		

Vazões afluentes

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios foram obtidos do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Piranhas e Piancó – PD-RH/PB (SCIENTEC, 1997). A série sintética de vazões médias mensais foi gerada pelo o modelo hidrológico chuva x vazão MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável), a partir de dados de

precipitação totais diários, com extensão de 57 anos (1933 a 1989).

Dados dos reservatórios estudados

Os dados das curvas cota-área-volume foram obtidos do Cadastro de Açude do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Piranhas e Piancó – PDRH/PB (SCIENTEC, 1997).

A Tabela 3 mostra o volume morto e a capacidade máxima de armazenamento (volume máximo) dos reservatórios.

Tabela 3 – Dados dos reservatórios estudados.

Reservatório	Volume (hm ³)	
	Máximo	Morto
Catolé I	10,50	0,50
Poço Redondo	62,75	3,33

A vazão máxima vertida projetada para cada reservatório foi determinada pela Equação (1) abaixo, referida em DAEE (2005):

$$Qy \max_r = 4,43 \cdot Cv_r \cdot Bv_r \cdot Lv_r^{1,5} \quad (1)$$

sendo Cv_r o coeficiente de descarga do vertedor do reservatório r ; Bv_r a largura de base do vertedor do reservatório r ; Lv_r a lâmina máxima d'água projetada sobre a soleira do vertedor do reservatório r .

Na Tabela 4 estão apresentados os dados dos vertedores e a cota de soleira (Hvert) de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 4 – Características físicas dos vertedores dos reservatórios estudados.

Reservatório	Cv^1	Bv^2 (m)	Lv^2 (m)	Hvert ² (m)
Catolé I	0,35	100	1,50	141,5
Poço Redondo	0,35	150	2,00	107,0

Fonte: ¹DAEE (2005) e ²PDRH/PB (SCIENTEC,1997)

A Tabela 5 apresenta os dados do coeficiente de vazão de descarga de fundo (Cf), diâmetro da seção transversal (Df), da cota de jusante da geratriz inferior (Hfs) e da cota de entrada (Hfe) do tubo de descarga de fundo de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 5 – Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios estudados.

Reservatório	Cf^1	Df^2 (mm)	Hfs (m)	Hfe (m)
Catolé I	0,60	200	127	127
Poço Redondo	0,60	500	88	88

Fonte: ¹DAEE (2005) e ²PDRH/PB (SCIENTEC,1997)

Demandas hídricas

Para a sub-bacia estudada foram consideradas as demandas hídricas de abastecimento humano nas cidades, irrigação das culturas agrícolas no perímetro irrigado e perenização do rio a jusante dos reservatórios. A Figura 2 apresenta a caracterização hídrica do sistema.

O reservatório Catolé I tem a finalidade de abastecimento da cidade de Manaíra, cuja demanda outorgada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA (2009) a Companhia de Água e Esgoto da Paraíba – CAGEPA é de 33,1 m³/h. O reservatório Poço Redondo abastece a cidade de Santana de Mangueira, com uma demanda outorgada a CAGEPA de 41,4 m³/h, e as demandas hídricas do Perímetro Irrigado Poço Redondo que possui uma área total de 500 ha.

Para a avaliação das demandas hídricas de irrigação foi estabelecido, primeiramente, um plano de cultivo para o perímetro considerado no estudo. Segundo a COIPPI – Cooperativa Agropecuária dos Irrigantes do Projeto Piancó (Lima, 2004) as culturas agrícolas previstas a serem cultivadas no perímetro irrigado são: manga, coco, graviola, mamão, banana, melancia, melão, feijão, tomate, cultivadas na safra e entressafra e algodão cultivado na entressafra.

Na Tabela 6 são apresentados dados característicos das culturas agrícolas adotados neste estudo. Os valores da produtividade das culturas agrícolas (Prod), custo de produção (Cprod) e mão-de-obra requerida (Hdc) foram retirados MANUAL de ORÇAMENTO AGROPECUÁRIO do BANCO do NORDESTE S/A (2006). O preço médio de comercialização (Prc), para o ano de 2010, foi obtido do Centro de Abastecimento Alimentar de Pernambuco – CEASA/PE (2011). Os valores dos custos de produção foram corrigidos de acordo com a inflação acumulada no período 2006-2010 (PORTAL BRASIL, 2011).

Os dados referentes ao sistema de irrigação (Tabela 7), sua eficiência de distribuição (Esis) e

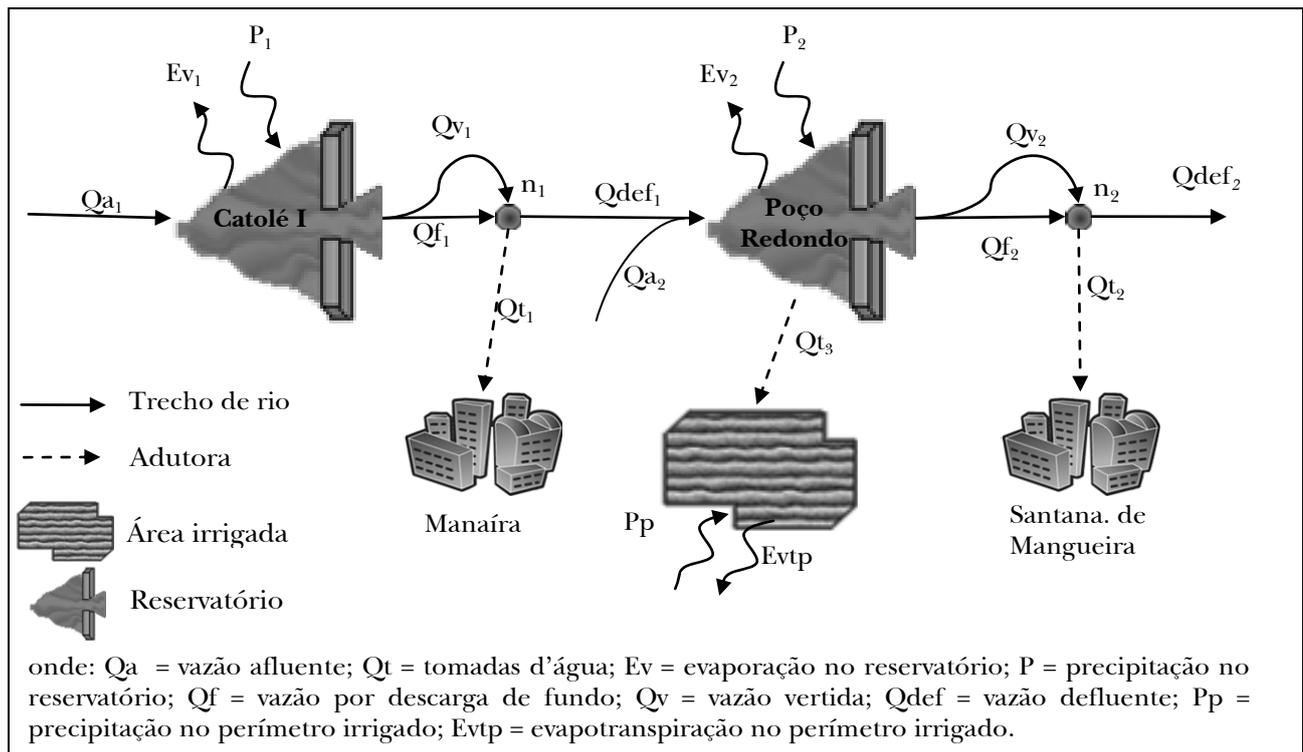


Figura 2 – Layout do sistema estudado

Tabela 6 – Dados característicos das culturas.

Culturas agrícolas	Prod (kg/ha/ano) ¹ (fruto/ha/ano)	Prc (R\$/kg) ¹ (R\$/fruto)	Cprod (R\$/ha/ano)	Hdc (diárias/ha/ano)	Sistema de irrigação
Temporárias					
Algodão (es)	2.700	1,25	3.785	80	microaspersão
Feijão (s)	1.800	3,00	2.007	61	microaspersão
Feijão (es)		3,20			
Melancia (s)	25.000	0,50	4.564	115	gotejamento
Melancia (es)		0,40			
Melão (s)	15.000	1,00	6.436	137	gotejamento
Melão (es)		0,85			
Tomate (s)	40.000	3,70	7.978	252	microaspersão
Tomate (es)		1,23			
Perenes e semi-perenes					
Mamão	15.000	0,88	5.288	161	gotejamento
Banana	40.000	0,72	5.895	213	gotejamento
Manga	15.000	0,96	4.749	161	gotejamento
Coco verde ¹	40.000	0,88	3.831	120	gotejamento
Graviola	7.000	2,40	4.941	180	gotejamento

s – safra; es – entressafra

requerimento de pressão (ΔH) estão de acordo com Doorenbos e Kassam (2000) e Gomes (1999). A eficiência de aplicação (E_{ap}) segue a disposta na Resolução nº 687 da Agencia Nacional de Águas (ANA, 2004).

Tabela 7 - Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas agrícolas.

Sistema de irrigação	E _{sis}	E _{ap}	ΔH (mca)
Microaspersão	0,90	0,85	20
Gotejamento	0,90	0,90	10

Assumiu-se que o preço da água bruta para irrigação é de R\$ 36,00/1.000 m³ de água segundo estudos do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (TC/BR-COMCREMAT, 2006) e o preço de energia elétrica de R\$ 0,15959/kWh considerado a tarifa verde fora de ponta segundo dados da concessionária local (ENERGISA, 2011). Estima-se que o sistema de bombeamento tenha uma eficiência de 75%. Para cada uma das culturas agrícolas acima citadas foi designada uma área máxima de cultivo de 80 hectares. Não foram estabelecidas áreas mínimas para as culturas agrícolas, de forma que as que não dessem um retorno financeiro adequado pudessem ser excluídas da solução ótima.

Para a determinação da necessidade de lixiviação dos sais (LR_{jkt}) dissolvidos que se acumulam no solo cultivado utilizou as equações propostas por Rhoades e Merrill (1976) apud Gomes (1999):

- Para irrigação por inundação ou aspersão de baixa frequência:

$$LR_{jkt} = \frac{CE_{a_{kt}}}{5 * CE_j - CE_{a_{kt}}} \quad (2)$$

- Para irrigações de alta frequência (gotejamento e microaspersão):

$$LR_{jkt} = \frac{CE_{a_{kt}}}{5 * CE_j} \quad (3)$$

onde, $CE_{a_{kt}}$ é a condutividade elétrica da água de irrigação aduzida para o perímetro irrigado k durante o mês t (em dS/m), medida a 25 °C; CE_j é a condutividade elétrica do extrato de solo saturado

(em dS/m) e que acarreta uma determinada redução no rendimento potencial da cultura j .

Conforme sugerido por Ayers e Westcot (1985 apud Gomes 1999), escolhe-se o valor de CE_j que acarreta uma redução 10% do rendimento potencial da cultura j para a aplicação da Equação 2 e de 100% para a aplicação da Equação 3.

A condutividade elétrica da água da sub-bacia, segundo dados da SUDEMA (2009), é de cerca 0,55 dS/m. A condutividade elétrica do extrato de solo saturado que acarreta 100% de redução no rendimento potencial da cultura agrícola foi obtida de Ayers e Westcot (1999).

Para a determinação da vazão defluente mínima liberada pelos reservatórios para a perenização do rio a jusante dos mesmos utilizou o método proposto por Garcia e Andreatza (2004), devido à capacidade de manter o comportamento sazonal do curso d'água. Os valores das vazões afluentes máximas e mínimas para cada mês de cada reservatório estudado foram determinados segundo as recomendações de Santos et al. (2006). Os valores dos coeficientes de sustentabilidade máximos e mínimos utilizados foram 0,8 e 0,2 respectivamente.

CENÁRIOS ESTUDADOS

Para a operação do sistema foram considerados os seguintes objetivos:

- minimização do déficit do atendimento das demandas de abastecimento urbano;
- minimização do déficit do atendimento do volume meta dos reservatórios;
- minimização do déficit do atendimento da vazão defluente mínima dos reservatórios;
- maximização da receita líquida oriunda da agricultura irrigada;
- maximização da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada;

Para permitir uma boa compreensão e avaliação do comportamento das respostas hídricas do modelo, quando submetido a mudanças de prioridade de atendimento dos objetivos, foram estabelecidos cenários que estão centrados em aspectos operacionais do sistema. A Tabela 8 apresenta as prioridades de cada objetivo para cada cenário analisado, sendo o atendimento da demanda de abastecimento urbano sempre a 1ª prioridade em todos os cenários

e o volume meta dos reservatórios sempre a última prioridade.

Tabela 8 – Prioridades dos objetivos do modelo em cada cenário.

OBJETIVOS	PRIORIDADES			
	C1	C2	C3	C4
Abastecimento Urbano	1º	1º	1º	1º
Perenização do rio	2º	3º	4º	4º
Receita líquida	3º	2º	2º	3º
Mão-de-obra	3º	2º	3º	2º
Volume meta	4º	4º	5º	5º

sendo, C1 – cenário 1; C2 – cenário 2; C3 – cenário 3; C4 – cenário 4;

O coeficiente de ponderação para cada objetivo dependerá da prioridade de atendimento dos mesmos. Para a 1ª prioridade: $\omega = 10^4$; 2ª prioridade: $\omega = 10^3$; 3ª prioridade: $\omega = 10^2$; 4ª prioridade: $\omega = 10^1$; 5ª prioridade: $\omega = 10^0$;

CRITÉRIOS OPERACIONAIS

Os critérios operacionais idealizados para todos os cenários observaram os seguintes pressupostos:

- O período de estudo corresponde a 9 (nove) anos, iniciando o processo de otimização no mês de janeiro.
- O volume inicial dos reservatórios foi estabelecido como sendo 60% da capacidade dos mesmos.
- O volume do reservatório, ao final do período de estudo de otimização, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo a sustentabilidade hídrica das atividades econômicas;
- O volume meta dos reservatórios, em todos os meses, foi considerado igual à capacidade dos mesmos;
- As demandas de abastecimento urbano tiveram um aumento na vazão de 2,8% ao ano, segundo dados do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Piranhas e Piancó – PDRH/PB (SCIENTEC, 1997).

- As capacidades das tomadas d’água destinada ao abastecimento humano foram consideradas iguais as suas respectivas demandas. Quanto à capacidade do sistema adutor para o perímetro irrigado considerou-se um sistema formado de 5 bombas com uma vazão de 1 m³/s trabalhando 20 horas por dia.
- As perdas por evaporação e a infiltração em cada calha do rio foram consideradas da ordem de 10%.

Para a operação do perímetro irrigado foram observados os seguintes pressupostos:

- O calendário agrícola estabelecido para o perímetro irrigado é mantido invariável para todos os cenários estudados; as culturas agrícolas permanentes estão consideradas em plena capacidade de produção;
- Os custos de produção e os preços de comercialização das culturas agrícolas tiveram um reajuste anual de 5%;
- No cálculo das demandas de irrigação considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas;

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos via um computador de processador DualCore Intel Core 2 Duo 2.00 GHz com 2 Gigabytes de memória RAM. Para os 9 anos de operação foram consideradas 3.802 variáveis de decisão e 440 equações de restrições de igualdade e 434 equações de restrições de desigualdade.

A Tabela 9 apresenta os valores de cada função objetivo e o tempo de processamento para os cenários propostos onde, DTD1 e DTD2 - minimização do déficit do atendimento das demandas de abastecimento urbano da cidade de Manaíra e de Santana de Mangueira, respectivamente; VE1 E VE2 - minimização do déficit entre a vazão defluente e a vazão defluente mínima do reservatório Catolé I e Poço Redondo, respectivamente; VM1 e VM2 - minimização do déficit entre o volume de água e o volume meta do reservatório Catolé I e Poço Redondo, respectivamente; RL - maximização da receita líquida oriunda da agricultura irrigada; MO - maximização da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada;

Tabela 9 – Valores das funções objetivos e o tempo de processamento para cada cenário.

OBJETIVO		C1	C2	C3	C4
MIN	DTD1	0,00	0,00	0,00	0,00
MIN	DTD2	0,00	0,00	0,00	0,00
MIN	VE1	0,38	0,38	0,41	0,41
MIN	VE2	0,29	0,36	0,40	0,39
MIN	VM1	0,16	0,16	0,17	0,17
MIN	VM2	0,18	0,19	0,19	0,19
MAX	RL	0,75	0,80	0,85	0,79
MAX	MO	0,57	0,69	0,62	0,70
Tempo (s)		9	12	19	15
Iterações		5	5	6	7

Tem-se que o tempo de processamento para se obter uma solução ótima e o número de iterações, para todos os cenários, é considerado satisfatório para o sistema em questão, tendo em média 14 segundos e 6 iterações.

Para todos os cenários as demandas estabelecidas para o abastecimento urbano são atendidas sem apresentarem falhas (déficit igual a zero). Observa-se que os melhores valores das funções objetivo RL, MO, VE1 e VE2 são nos cenários onde tais objetivos têm maior prioridade de atendimento evidenciando a capacidade do modelo em realizar a análise multiobjetivo.

A área alocada para as culturas agrícolas em cada cenário pode ser observada na Tabela 10 abaixo.

Nota-se que as áreas das culturas agrícolas são alocadas de acordo com os objetivos estabelecidos para cada cenário. De modo que, para o cenário 3 estão alocadas as áreas das culturas agrícolas que proporcionam maior receita líquida enquanto que no cenário 4 estão aquelas que resultam em maior mão-de-obra. Porém, observa-se que algumas culturas agrícolas atendem aos dois objetivos simultaneamente, como, por exemplo, o tomate que apresenta uma boa lucratividade gerando um maior número de emprego (comparado com outras culturas). Quando não há preferência por nenhum desses objetivos (cenário C2), as áreas das culturas agrícolas são alocadas de modo a atender aos dois objetivos ao mesmo tempo, podendo ocasionar numa redução nos valores da receita líquida e/ou da mão-de-obra, comparada com as situações onde esses objetivos tenham prioridade maior (ver Tabela 8). Para o cenário 1 tem-se a menor quantidade de área alocada, pois nesse caso a perenização do rio a ju-

sante dos reservatórios tem maior prioridade de atendimento.

Tabela 10 – Área alocada (ha) das culturas agrícolas para cada cenário.

Culturas agrícolas	C1	C2	C3	C4
feijão (s)	80,0	80,0	80,0	80,0
tomate (s)	80,0	80,0	80,0	80,0
melancia (s)	80,0	80,0	80,0	80,0
melão (s)	80,0	80,0	80,0	80,0
algodão (es)	0,0	80,0	0,0	80,0
feijão (es)	0,0	80,0	0,0	80,0
tomate (es)	80,0	80,0	80,0	80,0
melancia (es)	80,0	80,0	80,0	80,0
melão (es)	80,0	80,0	80,0	80,0
mamão	0,0	0,0	0,0	3,3
banana	42,3	80,0	35,1	80,0
manga	0,0	0,0	0,0	0,0
coco verde	0,0	2,1	80,0	0,0
graviola	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	602	802	675	803

Tabela 11 - Vazões médias mensais (L/s) aduzidas para o perímetro.

	C1	C2	C3	C4
Janeiro	8,43	17,32	58,66	17,39
Fevereiro	2,73	5,62	19,54	5,56
Março	3,75	4,81	16,17	4,72
Abril	6,72	8,86	26,25	9,41
Mai	19,72	28,68	58,03	29,85
Junho	21,06	41,21	68,27	42,67
Julho	28,36	55,14	78,92	56,75
Agosto	48,32	93,48	116,54	95,56
Setembro	58,22	111,03	129,26	113,1
Outubro	116,85	200,74	198,82	203,1
Novembro	213,60	340,50	290,20	342,6
Dezembro	35,26	68,86	109,54	69,92
Média	46,92	81,35	97,52	82,56
Máximo	338,51	600,39	422,61	602,8

A Figura 3 mostra que a vazão destinada ao suprimento hídrico do perímetro irrigado é variável ao longo do tempo, tendo um comportamento típico, com os menores valores na estação chuvosa (fevereiro a abril) e os maiores na estação seca (agosto a novembro) para os anos nos quais o índice pluviométrico é baixo. Como se observa na Tabela 11, o cenário 3 tem o maior volume aduzido de água para

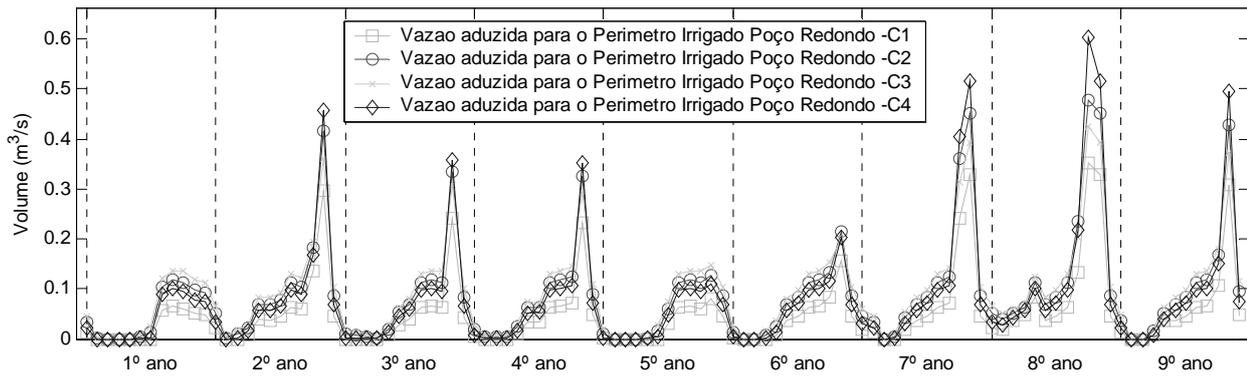


Figura 3 – Vazões aduzidas para o perímetro irrigado para todos os cenários.

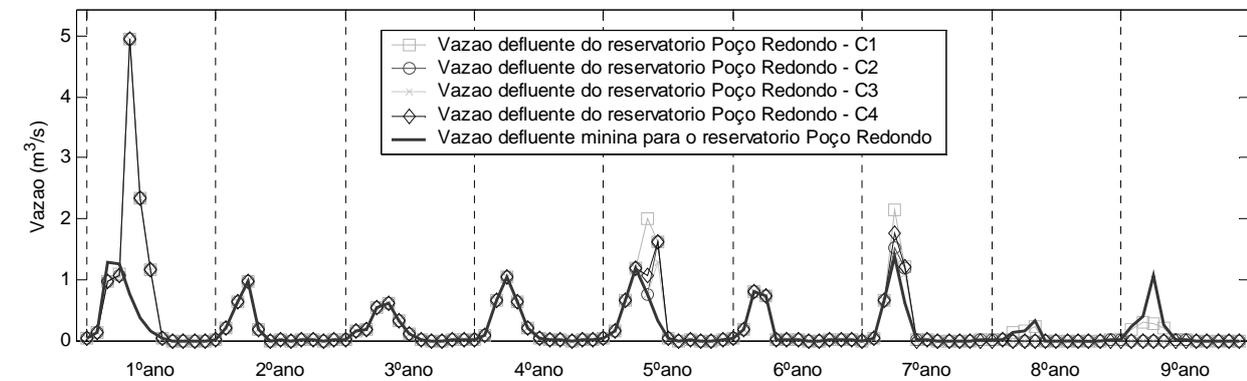
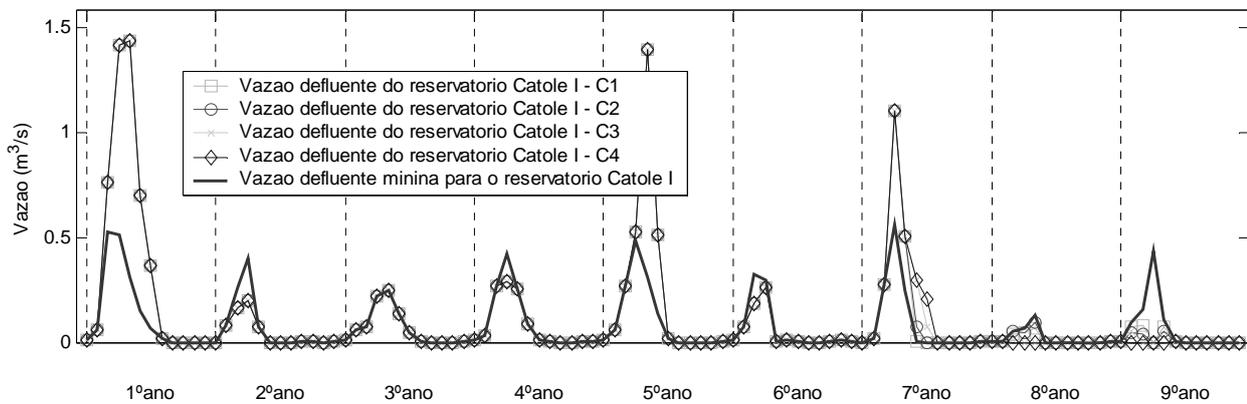


Figura 4 – Vazões defluentes dos reservatórios para a perenização do rio para todos os cenários.

o perímetro devido à maior área alocada para culturas agrícolas perenes, que requerem um maior suprimento hídrico ao longo do ano. No entanto, os maiores picos de vazão aconteceram no cenário 4, pois neste caso são cultivadas nas culturas agrícolas na entressafra.

A Figura 4 apresenta as vazões defluentes dos reservatórios responsáveis pela perenização rio a jusante dos mesmos. Observa-se que essa demanda não é plenamente atendida pelo reservatório Catolé I na estação chuvosa devido à maior demanda desse período e ao limite superior de vazão de descarga de fundo máxima do mesmo. O reservatório Poço Re-

Tabela 12 – Volume evaporado, vazão de descarga de fundo e vazão vertida média dos reservatórios.

Reservatório	Evaporação ($10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$)				Vazão de descarga de fundo ($\text{m}^3/\text{s}/\text{ano}$)				Vazão vertida ($\text{m}^3/\text{s}/\text{ano}$)			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Catole I	0,24	0,24	0,24	0,24	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08
Poço Redondo	0,96	0,95	0,94	0,95	0,20	0,19	0,18	0,19	0,10	0,08	0,07	0,08

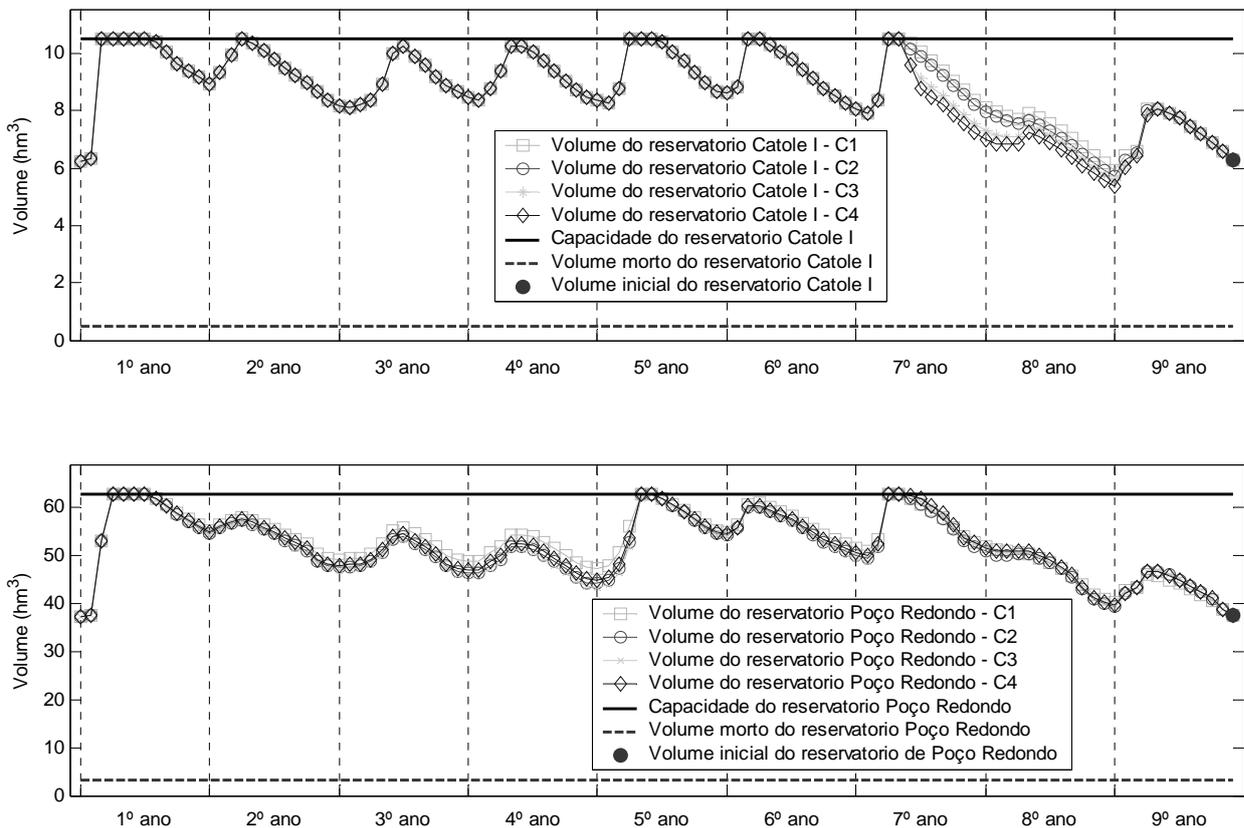


Figura 5 – Volume de água dos reservatórios estudados para todos os cenários.

do, por apresentar uma maior estrutura física, não apresenta restrição quanto ao atendimento dessa demanda. Entretanto no 9º ano (ano com o índice pluviométrico baixo, bem abaixo da média) tal demanda apresenta falhas de atendimento para todos os cenários por causa da maior prioridade da demanda de abastecimento urbano, sendo que no cenário 4 o déficit hídrico é total.

A Figura 5 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios para todos os cenários. Observa-se um comportamento característico para todos os cenários, diminuição entre agosto a dezembro (meses com menores vazões afluentes)

aumentando na estação chuvosa (entre fevereiro a maio). Não há mudança significativa do volume de água dos reservatórios entre os cenários, fato também observado na objetivos têm última prioridade de atendimento em todos os cenários. Os volumes finais dos reservatórios são iguais aos volumes iniciais propostos em todos os cenários garantindo assim a sustentabilidade hídrica das demandas.

Os volumes evaporados médios anuais, a vazão de descarga de fundo e as vazões vertidas médias dos reservatórios podem ser observadas na Tabela 12. Praticamente, para todos os cenários, os volumes evaporados são similares, pois ele é função da área

do espelho d'água do reservatório e, conseqüentemente, do volume de água. As vazões vertidas pelos reservatórios ocorrem geralmente nos meses de abril e maio, podendo também ocorrer em março ou junho. O valor máximo observado, para todos os cenários, foi de 1,35 m³/s para o reservatório Catolé I e 4,28 m³/s para o reservatório Poço Redondo, ambas ocorridas em maio do 1º ano.

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que os objetivos são atendidos de acordo com as prioridades de atendimento pré-estabelecidas comprovando que modelo efetua uma análise multiobjetivo.

O tempo de processamento e o número de iterações para a obtenção da solução ótima foi considerado satisfatório. Para o referido sistema, com horizonte operacional de 9 anos foram necessários cerca de 14 segundos e 6 iterações. Com relação ao perímetro irrigado, as culturas agrícolas foram selecionadas de acordo com as prioridades específicas de cada cenário. Observa-se que houve alocação de áreas para as culturas agrícolas sazonais (destaque para o tomate, melancia e melão) e a banana em todos os cenários.

Os resultados obtidos para a operação do sistema podem servir como subsídio na geração de regras operacionais para a alocação da água entre os múltiplos usuários do sistema considerando os objetivos e as restrições físicas estabelecidas.

AGRADECIMENTOS

Ao CTHIDRO/CNPq pelo o apoio concedido ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- AESA (2009). Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/consultas/listaUsuarios.php?tipo=outorgado&bacia=Piancó>. Data da consulta: 15 de junho de 2009.
- ANA (2004). Resolução nº 687, de 03 de Dezembro de 2004. Agência Nacional de Águas.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2a. edição. Campina Grande: DEAg/CCT/UFPB. 1999. 153p.(Estudos FAO irrigação e drenagem, 29 revisado 1)
- BANCO DO NORDESTE S/A (2006). Manual de Orçamentos Agropecuários. Campina Grande – PB.
- CEASA/PE (2011) Centro de Abastecimento Alimentar de Pernambuco. Disponível em: <http://www.ceasape.org.br/cotacao.php>. Data da consulta: 28 de julho de 2011.
- DAEE (2005). *Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas*. São Paulo. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 116p.
- DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. (2000). Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Sousa, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. *Efeito da Água no Rendimento das Culturas*. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, v. 33, UFPB, Campina Grande.
- ENERGISA (2011). Energisa Paraíba - Distribuidora de Energia S/A. Disponível em: <http://www.energisa.com.br/paraiba/paginas%20internas/tarifas.aspx>. Data da consulta: 28 de julho de 2011.
- GARCIA, L. A. V.; ANDREAZZA, A. M. P. (2004). *Estabelecimento de Vazões Ambientais Efluentes de Barragens – Sugestão Metodológica*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 9, n. 2, pp. 74-95.
- GOMES, H. P. (1999). *Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento*. Editora Universitária – UFPB, Campina Grande-PB, 3ª Edição. 412 p.
- LIMA, C. A. G. (2004). *Análise e Sugestões para Diretrizes de Uso das Disponibilidades Hídricas Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó, Localizada no Estado da Paraíba*. Campina Grande: UFCG - Doutorado Temático em Recursos Naturais. 274p. Tese de Doutorado.
- OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. H. V. (2005). *Estimativa da Evaporação e Análise de Uso do Coeficiente (kp) do Tanque "Classe A" nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 10, n. 4, p. 73-83.
- PORTAL BRASIL (2011). Índice Nacional De Preços Ao Consumidor Amplo - IPCA. Disponível em: <http://www.portalbrasil.net/ipca.htm>. Data da consulta: 28 de julho de 2011.
- SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. S. (2006). *Análise de Metodologia para Determinação de Vazão a Jusante de Reservatórios no Semi-árido Nordestino*. In: XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Gravata. CD-ROM.
- SCIENTEC (1997). Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. *Plano Diretor de Recursos Hídricos*.

dricos da Paraíba: Bacias do Rio Piancó e do Alto Pi-ranhas. SEPLAN. Paraíba. Brasil.

SUDEMA (2009). Superintendência de Administração do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.sudema.pb.gov.br/artigo.php?id=31052007024108>. Data da consulta: 15 de junho de 2009.

TC/BR-CONCREMAT (2006). *Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo & Atlas* | Governo do Estado da Paraíba; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, SECTMA; Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. – Brasília, DF.

SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. (2010) *Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos: I Metodologia.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. -, n. -, p. -.

VIEIRA, V. P. P. B. (1996). *Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semiárido Nordestino.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 1, n. 1, p. 91-107.

Key-words: *Water Resources, optimization, linear programming, linearization.*

A Multiobjective Optimization Model for Water Resource System Analysis: II Application

ABSTRACT

This work involves the application of a multiobjective optimization model based on sequential linear programming to a two-reservoir system connected in sequence and a 500 ha irrigated perimeter, located in the semiarid region of Paraíba state. The water demands are for urban water supply, irrigation and the regulation of river flow downstream from the reservoirs. The following objectives were considered to establish an optimal operation: to meet the water demands for urban supply, regulated flow downstream from the reservoirs and the reservoir target volumes, as well as maximizing net profit and manpower from agricultural activity. Scenarios that vary the priorities of different objectives were created in order to evaluate the model response regarding the consistency of results and required computation time. The results have shown that the objectives were fulfilled in accordance with the assigned priorities and the problem constraints were met. The computation time and the number of iterations can be considered satisfactory (19 seconds and 5 iterations, on average, for a problem having 3802 decision variables and 874 constraints when considering 9 years of system operation). The results attained for system operation can support the generation of operational rules for water allocation in order to meet the required demands, objectives and physical constraints.