

Simulação e Otimização da Operação de um Sistema de Reservatórios: Bacia do Rio Curu

Walter Pereira Vianna Junior

Centro Federal de Ensino Tecnológico de Alagoas
walterjr@ifufrgs.br

Antônio Eduardo L. Lanna

Instituto de Pesquisas Hidráulica - UFRGS - Caixa Postal 15029
91501-970 Porto Alegre, RS - lanna@ifufrgs.br

Recebido: 14/08/00 - revisão: 17/09/01 - aceite: 14/05/02

RESUMO

Em grande parte do Nordeste brasileiro, a ocorrência de períodos recorrentes de escassez hídrica prejudica as atividades econômicas e de subsistência, provocando êxodo rural e concentração nos grandes centros urbanos. A operação de reservatórios, condicionada aos múltiplos propósitos do sistema, busca a formação de reservas nos períodos de excesso hídrico para usá-las nos períodos de escassez. Neste trabalho são utilizadas três regras de operação de reservatórios: regra padrão de decisão; regra padrão de decisão modificada e regra do zoneamento dos reservatórios. As duas últimas tiveram seus parâmetros obtidos através de um processo de otimização que, iterativamente, simula a propagação das vazões num sistema de recursos hídricos. Para avaliar o desempenho do sistema em cada simulação são utilizados seis critérios: confiabilidade; elasticidade; vulnerabilidade; número de falhas; somatório dos déficits e somatório do quadrado dos déficits. Procurou-se atender às demandas hídricas de acordo com um critério de prioridade que as dividiu em três categorias: demanda primária; secundária e terciária.

A metodologia proposta foi aplicada à bacia do rio Curu, no Ceará, cujo sistema possui seis reservatórios de grande porte, três dos quais são considerados estratégicos no presente trabalho.

Palavras-chave: *simulação; reservatórios; otimização.*

INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento adotado no Brasil provocou concentração populacional nos grandes centros e um indesejável êxodo no meio rural. No Nordeste brasileiro, o maior obstáculo para promover a fixação do homem no campo é a grande variação sazonal de ocorrência de chuvas, que provoca escassez hídrica em certas épocas, prejudicando a atividade econômica dependente da agricultura e, principalmente, a denominada agricultura de subsistência. Essa variação também se verifica em caráter interanual, provocando longos períodos de seca.

Para se modificar este caráter sazonal, uma das alternativas passíveis de adoção é a construção e operação de reservatórios, que basicamente têm como princípio de funcionamento a formação de reservas no período de excesso hídrico e o uso dessas reservas no período de escassez. Devido a características de multi-propósito dos reservatórios e do seu caráter conflitante, faz-se necessária a adoção de regras operacionais que contemplem todos esses usos, perante um quadro de objetivos atuais e futuros. Deve-se ainda levar em conta que num quadro de existência de um sistema, a adoção de medidas não-estruturais, como uma operação mais eficiente, é por vezes mais válida economicamente que a adoção de medidas estruturais, como a construção de outros reservatórios.

O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver e analisar diferentes técnicas de operação de múltiplos reser-

vatórios que atendam a diversos propósitos. Dentro desse escopo geral, buscou-se:

1. disponibilizar e utilizar seis critérios de avaliação da performance de um sistema de recursos hídricos, que são: número de falhas; confiabilidade; elasticidade; vulnerabilidade; somatório dos déficits hídricos e somatório do quadrado dos déficits hídricos;
2. diagnosticar o comportamento de um sistema de recursos hídricos existente, de acordo com os mesmos critérios de avaliação, diferenciando a operação isolada (cada reservatório atende apenas às demandas localizadas imediatamente à jusante dos mesmos) e a operação conjunta dos reservatórios de grande porte desse sistema, e adotando uma regra padrão de decisão;
3. implementar duas outras regras de operação, ou seja, regra padrão de decisão modificada e regra do zoneamento dos reservatórios, otimizando os parâmetros dessas regras, utilizando como funções objetivo composições dos critérios de avaliação já mencionados.

METODOLOGIA

Para definir a operação ótima do sistema de múltiplos reservatórios, com múltiplos propósitos da bacia do rio Curu, utilizou-se uma abordagem determinística, com futu-

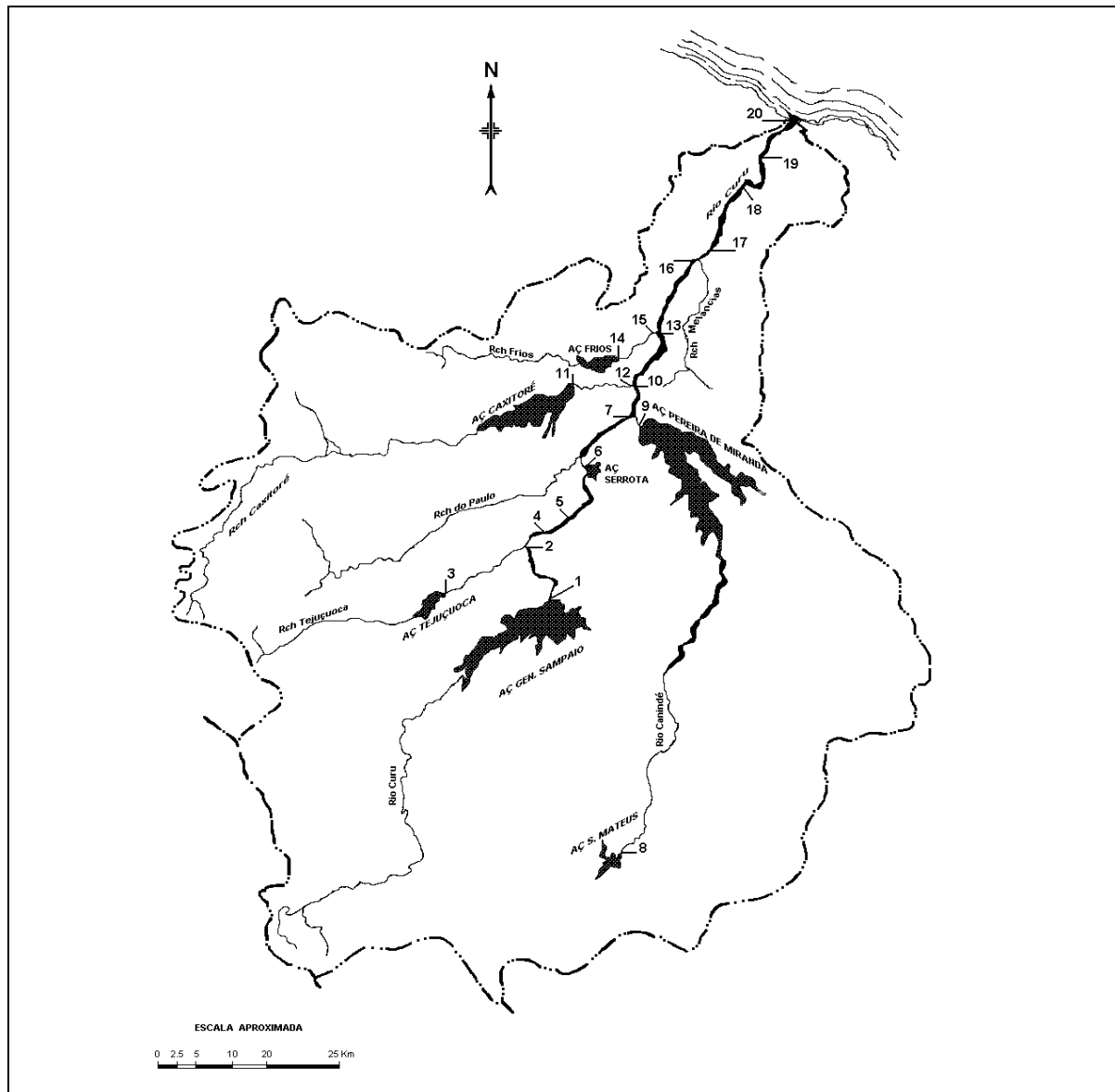


Figura 1. Localização adotada para os PC's da bacia do rio Curu.

ro conhecido, segundo os seguintes passos: a) extensão de uma série de vazões históricas, através da calibração e simulação do modelo chuva-vazão MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989); b) adoção de uma regra de operação específica, com parâmetros a serem ajustados; c) uso da série de vazões estendida para calibração dos parâmetros, obtendo-se a regra operacional ótima. Adotou-se um modelo de simulação controlado por uma técnica de busca, que iterativamente otimiza os parâmetros das regras operacionais, para cada objetivo pré-estabelecido.

Cada regra operacional adotada condiciona o atendimento às demandas hídricas da bacia em estudo, que por sua vez, são divididas em ordens de prioridade de atendimento.

São elas:

- A. Regra padrão de decisão: Esta regra não possui parâmetro a ser otimizado, determinando apenas que as demandas sejam atendidas de acordo com a disponibilidade hídrica de cada um dos reservatórios do sistema;
- B. Regra padrão de decisão modificada: Os parâmetros a serem otimizados são os valores dos racionamentos $\alpha_{z,t}$ (alfa) a serem impostos sobre a descarga de cada reservatório considerado estratégico no sistema. Como, neste trabalho, três reservatórios foram considerados estratégicos e o intervalo de simulação escolhido foi o mensal, foram otimizados 36 parâmetros, ou

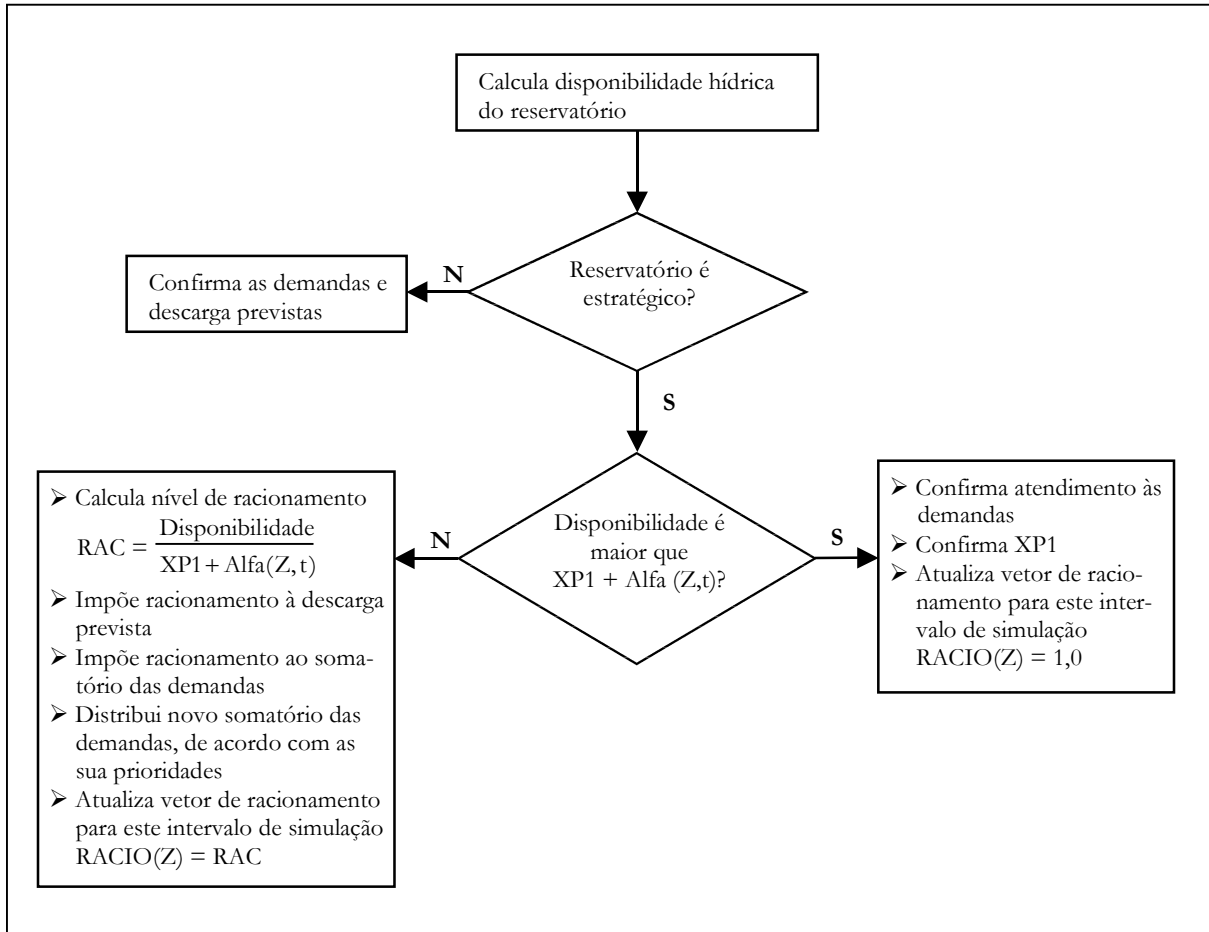


Figura 2. Diagrama de fluxo da sub-rotina OPERA do MODPROPAC.

seja uma regra operacional para cada mês do ano, para cada reservatório estratégico;

- C. Regra do zoneamento dos reservatórios: Nesta modalidade, para cada reservatório considerado estratégico foram definidas três zonas de atendimento às demandas. Essas zonas são delimitadas por dois níveis de referência (armazenamentos de referência) que são os parâmetros a serem otimizados. Neste caso, como o intervalo de simulação escolhido foi o mensal, foram otimizados 72 parâmetros (dois parâmetros por reservatório estratégico, que são três, e para cada mês do ano).

O SAGBAH

Adotou-se o SAGBAH – Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacias Hidrográficas como ferramenta computacional, que segundo Lanna (1993), é um sistema de apoio a decisões gerenciais voltado a analisar a adequação de políticas de gerenciamento de bacias hidrográficas. Este sistema possui várias das características, para ser con-

siderado um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) aplicado à recursos hídricos. Ou seja, apresenta aplicativos para lidar com os dados hidrológicos da bacia hidrográfica, além de modelos.

Dentre estes modelos destacam-se o MODHAC, modelo de transformação de chuva em vazão, e o PROPAGAR que simula a propagação de vazões na bacia. Destaca-se a flexibilidade que esses modelos possuem, tendo a capacidade de se adaptar a problemas diversos (Lanna e Schwarzbach, 1989; Chaves, 1993; Freitas, 1996; Pereira, 1996). Nesta mesma literatura podem-se encontrar maiores detalhes sobre os modelos acima citados.

O PROPAGAR

O programa PROPAGAR simula a propagação de vazões em uma bacia submetida a decisões operacionais, relacionadas ao suprimento de demandas hídricas e descarga de reservatórios.

A bacia em estudo é discretizada em sub-bacias, unidas por trechos fluviais, nas extremidades dos quais são

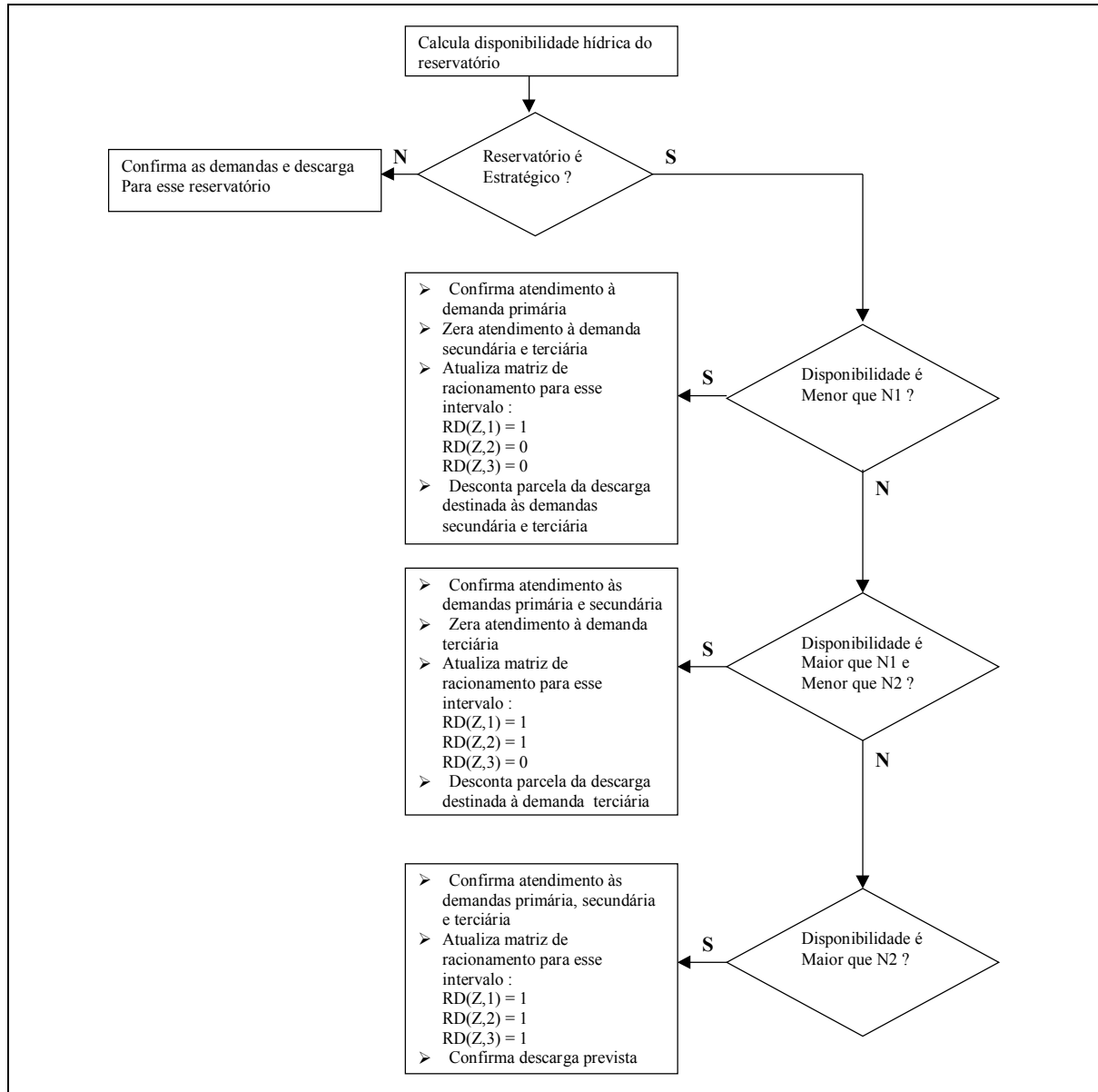


Figura 3. Diagrama de fluxo da sub-rotina OPERA do MODPRORES.

definidos os Pontos Característicos (PC's). Estes PC's representam, de forma segmentada a rede de drenagem da bacia inteira e a quantidade dos mesmos é definida de tal forma que cada um represente a saída d'água de um reservatório ou um ponto de demanda significativa, ou ainda, represente o somatório de um conjunto de demandas. Normalmente cada PC representa um único ponto de demanda, porém nos casos em que existem muitos pontos de demanda de menor magnitude, opta-se por representar um conjunto delas por um único ponto.

Assim, cada um dos PC's que pode estar, ou não, submetido ao controle de reservatório, recebe uma afluên-

cia hídrica das bacias incrementais e outra concentrada, a primeira resultante do processo de transformação de chuva em vazão e a segunda originada dos PC's à montante. Para tanto, é estabelecida uma classificação hierárquica que sistematiza a propagação de vazões em toda a bacia, em cada intervalo de simulação.

A Figura 1 apresenta a localização dos PC's definida para a bacia do rio Curu.

As demandas a serem atendidas em cada PC, são divididas em três ordens de prioridades distintas: demandas primárias; secundárias e terciárias, que estabelece uma relação de preferência ao atendimento, entre as mesmas.

Os intervalos de tempo para a simulação, são o cinqüendial (5 dias), decendial (10 dias), quinzenal e mensal. O programa supõe que as vazões afluentes no PC mais à montante da bacia hidrográfica possa atingir o trecho mais à jusante no mesmo intervalo de tempo de simulação, ou seja, não é incorporado o tempo de passagem da água nem o amortecimento. Neste trabalho utilizou-se apenas o intervalo mensal.

As decisões operacionais são introduzidas em duas fases. Na primeira fase, de planejamento estratégico, são estabelecidas as políticas operacionais para todos os PC's. Na segunda fase, de operação tática, é verificado se as decisões estratégicas podem ser implementadas.

Modificações efetuadas no PROPAGAR

Para a introdução de parâmetros de racionamento no atendimento a demandas e a incorporação de regras operacionais dos reservatórios foram introduzidas modificações na rotina computacional do PROPAGAR, o que gerou duas novas versões, que daqui para frente serão chamadas de MODPROPAC – Modelo de Propagação com Parâmetros de racionamento Auto-Calibráveis, e de MODPRORES – Modelo de Propagação com Reservatórios sujeitos a Níveis Estratégicos de atendimento às demandas.

A fase de planejamento estratégico é efetuada, em ambos, através de uma sub-rotina denominada PLANEJA. Nesta rotina são definidos: os níveis de atendimento às demandas previstas para cada PC; o parcelamento das demandas a serem atendidas por cada reservatório, de acordo com a sua localização em relação aos PC's de jusante e de acordo com o armazenamento dos mesmos no início de cada intervalo temporal de computação; as descargas alvo para os PC's que correspondem aos pontos de descarga dos reservatórios, procurando atender aos déficits hídricos dos PC's de jusante, de acordo com o parcelamento estabelecido anteriormente.

Já a fase de operação tática para os PC's (com e sem reservatório) adquire características próprias de cada um dos modelos e será explicada detalhadamente a seguir.

Fica a cargo do usuário do modelo alterar o critério de capacidade de armazenamento acima do qual os reservatórios da bacia em questão serão considerados estratégicos, sujeitos assim aos parâmetros de racionamento ou níveis estratégicos de atendimento às demandas.

Em ambas versões novas do PROPAGAR, foi introduzida a rotina de otimização dos parâmetros, baseada no método de Rosenbrock, buscando gerar um modelo de simulação que obtivesse a otimização de parâmetros relacionados à operação do sistema. Também foram introduzidas rotinas para o cálculo dos critérios de avaliação, para o cálculo das funções objetivo e para a consideração do grau de prioridade de cada demanda. Essas rotinas serão detalhadas posteriormente.

O MODPROPAC

O MODPROPAC, Modelo de Propagação com Parâmetros de racionamento Auto-Calibráveis, é um modelo

Tabela 1. Localização dos PC's para a bacia do rio Curu.

PC	Localização
01	Rio Curu, pto de descarga do aç Gal. Sampaio
02	Rio Curu, a montante da foz do rch Tejuçuoca
03	Rch Tejuçuoca, pto de descarga do aç Tejuçuoca
04	Rio Curu, no município de Apuiarés
05	Rio Curu (conforme Figura 1)
06	Rio Curu, pto de descarga do açude Serrota
07	Rio Curu, a montante da foz do rio Canindé
08	Rio Canindé, pto de descarga do aç São Mateus
09	Rio Canindé, pto de descarga do aç Pentecoste
10	Rio Curu, a montante da foz do rch Caxitoré
11	Rch Caxitoré, pto de descarga do aç Caxitoré
12	Rch Caxitoré, na sua foz
13	Rio Curu, a montante da foz do rch Frios
14	Rch Frios, pto de descarga do aç Frios
15	Rch Frios, na sua foz
16	Rio Curu, a montante da foz do rch Melancias
17	Rio Curu, na comunidade de Cural Grande
18	Rio Curu, tomada d'água do Proj. Curu-Paraipaba
19	Rio Curu (conforme Figura 1)
20	Rio Curu, na sua foz

de otimização que busca valores ótimos de parâmetros de racionamento relacionados à regra padrão de decisão modificada, que condicionam a propagação de vazões em uma bacia submetida a decisões operacionais, relacionadas ao suprimento de demandas hídricas e à descarga de reservatórios. Este mesmo modelo possibilita a simulação da propagação de vazões na bacia, sujeita a parâmetros de racionamento fixos informados pelo usuário.

Na fase de operação tática, é verificado se as decisões estratégicas, estabelecidas a priori, podem ser implementadas. São confrontadas, então, restrições e condicionamentos de origem física, como também aquelas referentes à imposição de racionamento nas demandas a serem atendidas e nas descargas a serem efetuadas nos reservatórios considerados estratégicos. Essa imposição de racionamento está condicionada aos parâmetros vigentes em cada simulação e será detalhada para os PC's com e sem reservatório.

Fase tática para os PC's com reservatório

As decisões táticas referentes aos PC's com reservatório são definidas na sub-rotina OPERA, onde são corrigidas as previsões de atendimento a cada demanda, como também a previsão de descarga para cada reservatório. Essas decisões são efetuadas conforme o diagrama de fluxo descrito na Figura 2.

Neste diagrama tem-se que: XP1 é a descarga planejada na sub-rotina PLANEJA a ser mantida, ou alterada, na sub-rotina OPERA; Alfa (Z,t) é o parâmetro de racionamento para o reservatório estratégico Z, no intervalo de simulação t; RACIO (Z) é o fator multiplicativo de racionamento (variando entre 0.0 e 1.0) a ser imposto às de-

mandas previstas dos PC's à jusante do reservatório Z, na sua parcela de responsabilidade, no intervalo de simulação presente.

Fase tática para os PC's sem reservatório

Para os PC's localizados à jusante dos reservatórios considerados estratégicos na bacia, o racionamento é determinado da seguinte forma:

$$RAC = \sum_{z=1}^{NREST} PARC_{z,j} \times RACIO_z \quad (1)$$

onde RAC é o fator multiplicativo de racionamento (variando entre 0.0 e 1.0) a ser imposto no somatório das demandas do PC em exame; NREST é o número de reservatórios, considerados estratégicos, localizados a montante do PC em exame; PARC_{z,j} é a matriz de parcelamento de atendimento à demanda, determinada na sub-rotina PLANEJA, para o reservatório z e para o PC j em exame; RACIO_z é o vetor de racionamento, determinado na sub-rotina OPERA, para o reservatório z.

O somatório para o cálculo do racionamento só considera os reservatórios estratégicos que se localizam a montante do PC em questão, sendo definidos segundo a topologia da bacia. O racionamento (quando necessário) é então efetuado sobre o somatório das demandas a serem atendidas no PC em questão. Esse somatório é redistribuído, na sub-rotina RACIONA, de acordo com a prioridade das demandas e de acordo com a disponibilidade hídrica neste intervalo de computação.

O MODPRORES

O MODPRORES, Modelo de Propagação com Reservatórios sujeitos a Níveis Estratégicos de atendimento às demandas, é um modelo de otimização que busca valores ótimos de níveis estratégicos (ou armazenamentos de referência) de atendimento às demandas que definem o zoneamento dos reservatórios e que condicionam a propagação de vazões em uma bacia submetida a decisões operacionais relacionadas ao suprimento de demandas hídricas e à descarga de reservatórios. Também é possível a simulação da propagação de vazões na bacia, com níveis estratégicos de atendimento fixos e informados pelo usuário.

Na fase tática, para esse modelo, a imposição de racionamento está condicionada aos níveis estratégicos de atendimento às demandas, que também será detalhada a seguir.

Fase tática para os PC's com reservatório

Aqui, as decisões táticas também são definidas na sub-rotina OPERA, segundo o diagrama de fluxo descrito na Figura 3.

Tabela 2. Ordem de prioridade adotada para a bacia do rio Curu.

Prioridade	Usos
1	Abastecimento humano urbano
2	Abastecimento animal e industrial
3	Abastecimento para agricultura

Neste diagrama tem-se que: N1 e N2 são os níveis estratégicos de atendimento às demandas, inferior e superior, para o reservatório Z e para o intervalo de simulação vigente; RD (Z,i) é a matriz que, ao ser atualizada na sub-rotina OPERA, informa se a parcela da demanda de prioridade i, vai ser atendida (RD = 1), ou não (RD = 0), pelo reservatório Z.

Fase tática para os PC's sem reservatório

O atendimento ou não, parcial ou integral, às demandas de prioridade inferior é definido através da seguinte equação:

$$DSATc_i = \sum_{Z=1}^{NREST} DSAT_i \times RD_{Z,i} \times PARC_{Z,i} \quad (2)$$

onde DSAT_c_i é a demanda corrigida, de prioridade i, a ser atendida para o PC em questão; DSAT_i é a demanda a ser atendida, de prioridade i, para o PC em questão; NREST é o número de reservatórios considerados estratégicos, localizados a montante do PC em consideração; RD_{Z,i} é a matriz de racionamento (0 ou 1), definida na sub-rotina OPERA, para o reservatório Z e para a demanda de prioridade i; PARC_{Z,i} é a matriz de parcelamento de atendimento à demanda, determinada na sub-rotina PLANEJA, para o reservatório Z e para o PC j. Após ser imposto o racionamento às demandas de menor prioridade, o somatório de todas as demandas no PC em questão é redistribuído, conforme suas prioridades e conforme a disponibilidade hídrica, pela sub-rotina RACIONA.

CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS

Os modelos desenvolvidos utilizam o método de Rosenbrock (Tucci, 1998), de rotação das coordenadas, para buscar os valores das variáveis que resultem no melhor valor de uma função objetivo escolhida pelo usuário dos modelos. Conforme já discutido anteriormente para o MODPROPAC essas variáveis são os parâmetros de racionamento $\alpha_{z,t}$ e para o MODPRORES são os níveis estratégicos de atendimento às demandas N1_{z,t} e N2_{z,t}. Assim, são efetuadas várias simulações até que se atinja um dos critérios de parada do processo iterativo. Esses critérios são: número máximo de iterações, precisão do valor da função objetivo, precisão do valor das variáveis.

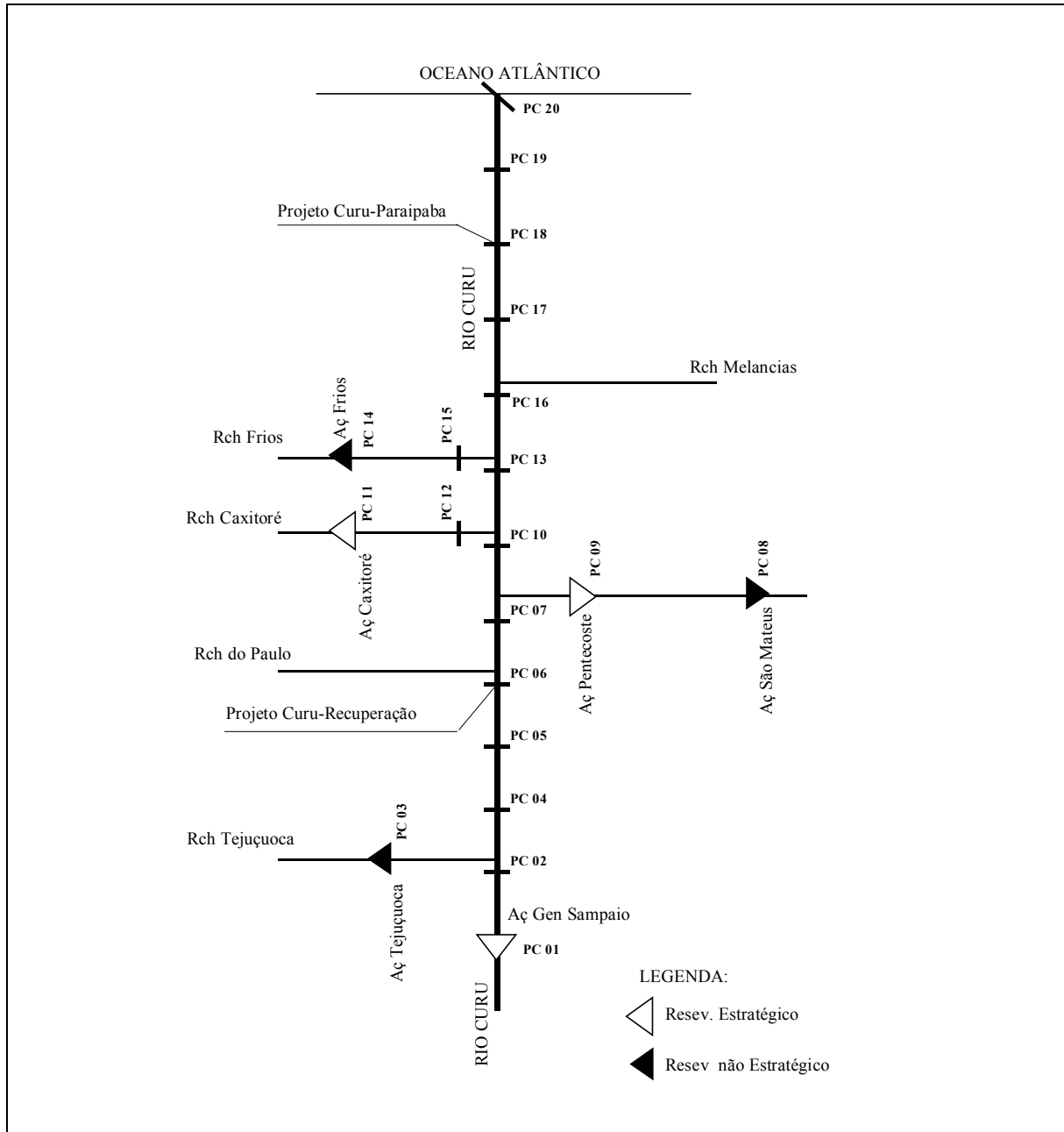


Figura 4. Esquema adotado para a topologia da bacia do rio Curu.

CRITÉRIOS PARA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA

Para compreender e avaliar os resultados advindos da operação de reservatórios, que fazem parte de um sistema, torna-se necessária a adoção de critérios que representem o grau de atendimento aos objetivos desse sistema de recursos hídricos. Entre os vários critérios que existem utilizaram-se índices probabilísticos e índices de comportamento.

Índices probabilísticos

Os índices probabilísticos aqui utilizados foram os definidos por Hashimoto et al. (1982). Ou seja: a confiabilidade, a elasticidade e a vulnerabilidade. Esses índices fornecem uma boa descrição do comportamento do sistema, podendo então serem utilizados para avaliar os efeitos causados por diferentes regras de operação preestabelecidas para os reservatórios, ou mesmo auxiliar na avaliação de futuros projetos a serem implantados.

Tabela 3. Pesos e retornos adotados para as demandas na bacia do rio Curu.

	Demanda primária	Demanda secundária	Demanda terciária
Peso	100	10	1
Retorno	60%	0%	10%

Em geral, se utiliza apenas a confiabilidade do sistema para avaliar o seu comportamento. Para tal, se faz necessário minimizar a possibilidade de ocorrer falhas. Porém, a maneira pela qual seria possível incrementar esse índice acarretaria na adoção de medidas estruturais, que por sua vez seriam acompanhadas por um custo econômico cada vez mais alto e ainda assim limitadas por fatores físicos e climatológicos.

Assim, uma maneira de melhorar o comportamento do sistema, sem tentar eliminar completamente a possibilidade de falhas, é tentar diminuir o grau de severidade das falhas que porventura ocorram, como também aumentar a capacidade de recuperação do sistema a um estado satisfatório, uma vez que a falha ocorra. Desta forma, a inclusão da vulnerabilidade e da elasticidade, como índices de avaliação, se faz necessária para um completo estudo do comportamento do sistema.

Confiabilidade

O índice de confiabilidade (η) é definido como a probabilidade de um funcionamento sem falha, ou seja, com êxito no atendimento às demandas previstas do sistema, durante todo o intervalo de tempo de interesse. Logo:

$$\eta = \text{Pr ob}(x \in S) \tag{3}$$

onde x é o estado do sistema (caracterizado pelo atendimento à demanda) e S representa os estados satisfatórios do sistema. Matematicamente tem-se:

$$Z_t = \begin{cases} 1, \text{ se } x_t \in S \\ 0, \text{ se } x_t \in F \end{cases} \tag{4}$$

onde F representa os estados insatisfatórios do sistema, ou seja, quando a demanda atendida foi menor que a prevista. Finalmente:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z_t \tag{5}$$

sendo N o tamanho da amostra, ou seja, o período de simulação.

No caso do sistema de reservatórios a confiabilidade é função da demanda, dos afluxos ao sistema, das capaci-

Tabela 4. Valores de demanda mensal para os pontos característicos (m³/s).

PC	Demanda difusa	Demanda primária	Demanda secundária
01	0,029	0,014	0,004
02	0,001	0,000	0,000
03	0,001	0,000	0,000
04	0,007	0,031	0,019
05	0,000	0,000	0,000
06	0,006	0,000	0,000
07	0,004	0,000	0,000
08	0,004	0,093	0,059
09	0,055	0,072	0,037
10	0,003	0,000	0,000
11	0,023	0,088	0,020
12	0,001	0,000	0,000
13	0,001	0,018	0,003
14	0,005	0,000	0,004
15	0,001	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000
17	0,004	0,000	0,000
18	0,006	0,000	0,000
19	0,004	0,025	0,083
20	0,003	0,000	0,000

dades dos diversos reservatórios do sistema e das políticas de operação.

Elasticidade

O índice de elasticidade (φ) avalia o quão rapidamente o sistema retorna a um estado satisfatório de atendimento à demanda, uma vez que a falha tenha ocorrido.

Se o sistema, em estado de falha, tender a permanecer num estado insatisfatório por muito tempo, essa tendência pode ter sérias implicações sobre o sistema. Um sistema que tenha muitas falhas, mas que tende a se recuperar rapidamente é, em alguns casos, preferível a um sistema com poucas falhas, mas no qual as mesmas se recuperem lentamente.

A elasticidade é definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório.

Se w_t é o indicador da transição de um estado de êxito a outro de falha, esse índice pode ser definido como:

$$w_t = \begin{cases} 1, \text{ se } x_t \in S \text{ e } x_{t+1} \in F \\ 0, \text{ em qualquer outro caso} \end{cases} \tag{6}$$

A longo prazo, o valor prometido de w_t é igual a probabilidade P de que o sistema esteja em um período satisfatório S e passe para um período insatisfatório F no próximo intervalo de tempo. Então:

Tabela 5. Valores de demanda atual para irrigação para cada PC (m³/s).

PC	Valores mensais da demanda terciária											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
01	0,017	0,013	0,009	0,019	0,023	0,048	0,066	0,054	0,018	0,018	0,018	0,018
02	0,130	0,101	0,043	0,060	0,077	0,093	0,105	0,118	0,130	0,135	0,136	0,136
03	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
04	0,024	0,018	0,007	0,011	0,014	0,017	0,020	0,022	0,024	0,025	0,025	0,025
05	0,041	0,032	0,013	0,019	0,025	0,038	0,050	0,050	0,041	0,043	0,043	0,043
06	0,351	0,266	0,175	0,172	0,208	0,334	0,407	0,416	0,357	0,375	0,372	0,372
07	0,004	0,003	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
08	0,011	0,008	0,004	0,006	0,006	0,008	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011
09	0,272	0,205	0,171	0,148	0,171	0,395	0,556	0,516	0,316	0,299	0,293	0,293
10	0,022	0,016	0,013	0,011	0,013	0,021	0,021	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024
11	0,039	0,029	0,021	0,019	0,022	0,050	0,067	0,063	0,040	0,042	0,042	0,042
12	0,089	0,066	0,047	0,035	0,042	0,075	0,086	0,093	0,093	0,098	0,096	0,096
13	0,054	0,040	0,028	0,020	0,049	0,118	0,125	0,112	0,127	0,168	0,159	0,159
14	0,023	0,017	0,013	0,010	0,012	0,020	0,021	0,024	0,024	0,025	0,025	0,025
15	0,025	0,018	0,013	0,009	0,012	0,037	0,044	0,041	0,027	0,028	0,028	0,028
16	0,131	0,099	0,073	0,056	0,065	0,112	0,125	0,137	0,137	0,144	0,141	0,141
17	0,670	0,518	0,383	0,298	0,338	0,520	0,571	0,644	0,693	0,732	0,716	0,716
18	0,529	1,956	1,414	1,105	1,276	2,153	2,452	2,645	2,633	2,776	2,707	2,707
19	0,466	0,367	0,272	0,218	0,245	0,384	0,429	0,468	0,478	0,507	0,495	0,495
20	0,105	0,083	0,061	0,049	0,056	0,086	0,094	0,103	0,108	0,115	0,112	0,112

$$P = \text{Prob}(x_t \in S, x_{t+1} \in F) \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t \quad (8)$$

O tempo médio de permanência em F durante uma simulação de N períodos, TF, é calculado com o tempo total em falha dividido pelo número de vezes que tenha havido o estado F. Ou seja:

$$TF = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (1 - z_t)}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (w_t)} \quad (9)$$

Se N se aproxima do infinito, o valor de TF é a extensão esperada de tempo para que o comportamento do sistema permaneça em um estado não satisfatório, uma vez que tenha ficado insatisfatório. O valor esperado de TF é dado como:

$$E[TF] = \frac{1 - \eta}{p} \quad (10)$$

Desde que a elasticidade é dada pelo inverso do valor esperado de TF, tem-se:

$$\phi = \frac{p}{1 - \eta} = \frac{\text{Prob}(x_t \in S \text{ e } x_{t+1} \in F)}{\text{Prob}(x_t \in F)} \quad (11)$$

Vulnerabilidade

O índice de vulnerabilidade (γ) mede a importância da severidade das conseqüências das falhas do sistema, ou seja, se refere à magnitude da falha, se esta ocorre.

Para expressar a vulnerabilidade matematicamente, considera-se X_t a variável que representa o comportamento do sistema, que por sua vez pode tomar valores discretos de x_1 até x_N . Para construir um indicador quantitativo da vulnerabilidade do sistema, para falhas severas que ocorram, se associa a cada estado de falha discreta um indicador numérico da severidade do estado S_j , sendo E_j a probabilidade de que x_j corresponde a S_j seja a falha mais severa que ocorra na permanência do conjunto num estado insatisfatório F. Logo a vulnerabilidade pode ser descrita como:

$$\gamma = \sum_{j \in F} S_j \times E_j \quad (12)$$

Existem várias medidas razoáveis para que toda a vulnerabilidade do sistema possa ser expressa. Por exemplo: tomar todas as permanências em F e identificar como S_j seus piores valores. Neste trabalho a vulnerabilidade foi dada como:

$$\gamma = \sum_{j=1}^{NPF} S_j \times E_j \quad (13)$$

onde E_j é definido como o número de falhas em cada intervalo contínuo j , onde S_j é o valor do maior déficit de atendimento à demanda em cada um desses intervalos,

dividido pelo número total de falhas no período de simulação. NPF é o número de períodos de falhas contínuas (uma falha isolada também é considerada como intervalo contínuo).

Índices de comportamento

Estes tipos de indicadores descrevem o comportamento do sistema baseados diretamente na quantidade de falhas e nos déficits de atendimento às demandas previstas. São eles: o somatório do número de falhas; o somatório dos valores dos déficits; o somatório do quadrado dos valores dos déficits.

Funções objetivo disponibilizadas

Para se efetuar o processo iterativo de otimização, torna-se necessário a adoção de funções objetivo para avaliar a resposta do sistema quando submetido às variações nos valores das variáveis, que aqui serão os parâmetros de racionamento ou os níveis estratégicos de atendimento às demandas dos reservatórios. Nos modelos, MODPROPAC e MODPRORES, essas funções são calculadas através de uma sub-rotina denominada AVALIASIST.

Estas funções objetivo buscam minimizar ou maximizar os índices probabilísticos e de comportamento associados ao sistema. São elas então: FO 1 - minimizar o número total ponderado de falhas; FO 2 - maximizar o somatório ponderado das confiabilidades; FO 3 - maximizar o somatório ponderado das elasticidades; FO 4 - minimizar o somatório ponderado das vulnerabilidades; FO 5 - associação de todos os índices probabilísticos; FO 6 - minimizar o somatório ponderado dos déficits; FO 7 - minimizar o somatório ponderado do quadrado dos déficits.

Nos modelos utilizados fica a cargo do usuário a escolha de qual função objetivo escolher para o processo iterativo de otimização. Todas essas funções estão descritas abaixo:

$$FO1 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 P_i \times NF_i \right\} \quad (14)$$

$$FO2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 P_i \times [\max(PF_i)] \right\} \quad (15)$$

$$FO3 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 (-1) \times P_i \times [\min(\phi_i)] \right\} \quad (16)$$

$$FO4 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 P_i \times [\max(\gamma_i)] \right\} \quad (17)$$

$$FO5 = \min \{ FO2 + FO3 + (0,1) \times FO4 \} \quad (18)$$

Tabela 6. Escalas de desenvolvimento utilizadas para compor o cenário de 2020.

PC	Demanda primária	Demanda secundária	Demanda terciária
01	2,0	1,4	1,0
02	1,0	1,0	1,0
03	1,0	1,0	1,0
04	2,2	1,4	1,0
05	1,0	1,0	1,0
06	1,0	1,0	1,0
07	1,0	1,0	1,0
08	2,2	2,3	1,0
09	2,3	1,4	1,0
10	1,0	1,0	1,0
11	2,8	2,0	1,0
12	1,0	1,0	1,0
13	1,9	1,4	1,0
14	1,0	1,0	1,0
15	1,0	1,0	1,0
16	1,0	1,0	1,0
17	1,0	1,0	1,0
18	1,0	1,0	2,3
19	2,4	2,6	1,0
20	1,0	1,0	1,0

$$FO6 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[P_i \times \sum_{j=1}^{NPC} DEF_{i,j} \right] \right\} \quad (19)$$

$$FO7 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[P_i \times \sum_{j=1}^{NPC} (DEF_{i,j})^2 \right] \right\} \quad (20)$$

Nessas equações temos que: P_i é o fator de ponderação da demanda i ; NF_i é o número de falhas no atendimento à demanda de prioridade i em todos os PC's; $\max(PF_i)$ é o valor máximo encontrado, para a probabilidade de falha ao atendimento à demanda de prioridade i , entre todos os PC's; $\min(\phi_i)$ é o valor mínimo encontrado, para a elasticidade no atendimento à demanda de prioridade i , entre todos os PC's; $\max(\gamma_i)$ é o valor máximo encontrado, para a vulnerabilidade ao atendimento à demanda de prioridade i , entre todos os PC's; $DEF_{i,j}$ são os valores dos déficits hídricos observados durante todo o intervalo de simulação para a demanda de prioridade i , em cada um dos PC's j ; NPC é o número de PC's.

APLICAÇÃO

O presente trabalho foi aplicado à bacia do rio Curu, escolhida por possuir as características necessárias para possibilitar a utilização da metodologia proposta. Ou seja, a presença de reservatórios, comunidades e projetos de irrigação, que serviram para testar a capacidade dos modelos

em diagnosticar o quadro de conflitos existentes, segundo os critérios de avaliação propostos, e de atenuar as falhas no atendimento às demandas de acordo com as suas prioridades, melhorando assim a avaliação realizada no diagnóstico. Destacam-se nessa bacia seis reservatórios pelas suas capacidades ($> 8 \text{ hm}^3$): açude Pereira de Miranda (ou

Pentecoste), açude General Sampaio, açude Caxitoré, açude Tejuçuoca, açude Frios e o açude São Mateus.

A aplicação da metodologia se deu em três etapas:

1. Primeiro se efetuou a propagação das vazões na bacia, tentando atender às demandas e operando os re-

Tabela 7. Valores dos critérios de avaliação para a demanda primária, com a operação isolada dos reservatórios segundo a regra padrão de decisão.

PC	NF	$P(x_i \in F)$	Éta	Phi	Gama	Soma(Def)	Soma[(Def) ²]
01	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
02	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
03	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
04	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
05	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
06	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
07	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
08	149	0,46	0,54	0,09	0,19	25,734	4,776
09	92	0,28	0,72	0,13	0,17	15,103	2,493
10	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
11	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
12	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
13	8	0,02	0,98	0,75	0,01	0,040	0,000
14	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
15	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
16	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
17	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
18	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
19	82	0,25	0,75	0,21	0,05	4,651	0,272
20	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000

Tabela 8. Valores dos critérios de avaliação para a demanda secundária, com a operação isolada dos reservatórios segundo a regra padrão de decisão.

PC	NF	$P(x_i \in F)$	Éta	Phi	Gama	Soma(Def)	Soma[(Def) ²]
01	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
02	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
03	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
04	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
05	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
06	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
07	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
08	169	0,52	0,48	0,09	0,13	21,540	2,857
09	92	0,28	0,72	0,13	0,05	4,766	0,247
10	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
11	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
12	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
13	62	0,19	0,81	0,29	0,01	0,142	0,000
14	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
15	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
16	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
17	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
18	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
19	98	0,30	0,70	0,15	0,20	19,684	4,101
20	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000

Tabela 9. Valores dos critérios de avaliação para a demanda terciária, com a operação isolada dos reservatórios segundo a regra padrão de decisão.

PC	NF	$P(x_i \in F)$	Éta	Phi	Gama	Soma(Def)	Soma[(Def) ²]
01	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
02	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
03	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
04	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
05	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
06	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
07	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
08	173	0,53	0,47	0,09	0,01	1,593	0,016
09	97	0,30	0,70	0,13	0,39	29,950	10,533
10	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
11	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
12	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
13	87	0,27	0,73	0,16	0,15	9,619	1,240
14	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
15	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
16	88	0,27	0,73	0,16	0,12	9,074	0,979
17	93	0,29	0,71	0,15	0,71	57,654	37,507
18	110	0,34	0,66	0,12	6,17	577,245	3252,301
19	105	0,32	0,68	0,13	0,49	45,620	20,659
20	86	0,27	0,73	0,20	0,11	8,323	0,852

servatórios segundo uma regra padrão de decisão. Essa propagação foi efetuada através de simulação, testando a possibilidade dos reservatórios operarem de forma isolada (tentando atender às demandas dos PC's imediatamente à jusante de cada reservatório) e de forma conjunta, ou seja, tentando atender às demandas de acordo com as suas localizações na bacia e de acordo com os seus armazenamentos no início de cada intervalo de processamento. O objetivo desta etapa foi apresentar um diagnóstico da operação do sistema segundo os critérios de avaliação implementados no modelo de simulação PROPAGAR.

2. A segunda etapa consistiu da utilização do modelo MODPROPAC, já descrito anteriormente, com o objetivo de otimizar os parâmetros relacionados à regra padrão de decisão modificada, adotada para os reservatórios de maior porte da bacia (General Sampaio, Pentecoste e Caxitoré) cujas capacidades são superiores à 100 hm³, também operados de forma conjunta. Os demais são operados pela regra padrão simples.
3. A terceira etapa consistiu da utilização do modelo MODPRORES, com o objetivo de otimizar os valores dos níveis estratégicos (armazenamentos de referência) que devem ser adotados apenas para os três reservatórios de maior porte da bacia. Assim como na segunda etapa os demais reservatórios são operados pela regra padrão simples.

Nas simulações para diagnóstico e nas efetuadas iterativamente para otimização dos parâmetros das regras operacionais, foi utilizada uma série de vazões médias mensais, com extensão de 27 anos. A série foi gerada de-

Tabela 10. Valores das funções objetivo para o sistema operando de forma isolada.

Função Objetivo	Valor
FO1	38149
FO2	31,80
FO3	-14,50
FO4	24,80
FO5	19,80
FO6	5753,183
FO7	4150,218

terministicamente com o modelo MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989) para as sub-bacias incrementais a cada PC a partir da pluviometria, compreendendo o período de 1962 a 1988. A calibração do modelo MODHAC foi efetuada para o posto de São Luiz do Curu para o período de 1968 a 1985 que é o único com dados fluviométricos disponíveis para a bacia em estudo (Ceará, 1992).

Todos os dados utilizados (postos pluviométricos, evapotranspiração, características técnicas dos reservatórios, etc.) encontram-se mais detalhados no trabalho de Vianna Jr. (1998).

Localização dos PC's na bacia

As localizações dos PC's na bacia, apresentadas na Figura 1, foram definidas de acordo com as localizações dos reservatórios, com a confluência de alguns cursos

d'água e com a localização de pontos de demandas (ou de um conjunto delas). Essas demandas representam cidades, irrigantes particulares ou projetos públicos de irrigação. Essas localizações são apresentadas no esquema da Figura 4 e estão detalhadas na Tabela 1.

Demandas e prioridades

No presente trabalho foram adotadas três ordens de prioridade para as demandas que se adequam à legislação federal e estadual e estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 11. Valores dos critérios de avaliação para a demanda primária, com a operação conjunta dos reservatórios segundo a regra padrão de decisão.

PC	NF	$P(x_i \in F)$	Éta	Phi	Gama	Soma(Def)	Soma[(Def) ²]
01	5	0,02	0,98	0,20	0,03	0,140	0,004
02	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
03	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
04	5	0,02	0,98	0,20	0,07	0,341	0,023
05	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
06	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
07	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
08	149	0,46	0,54	0,09	0,19	25,734	4,776
09	27	0,08	0,92	0,15	0,17	4,453	0,735
10	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
11	14	0,04	0,96	0,14	0,25	3,369	0,816
12	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
13	5	0,02	0,98	0,20	0,03	0,171	0,006
14	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
15	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
16	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
17	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
18	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
19	7	0,02	0,98	0,14	0,06	0,417	0,025
20	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000

Tabela 12. Valores dos critérios de avaliação para a demanda secundária, com a operação conjunta dos reservatórios segundo a regra padrão de decisão.

PC	NF	$P(x_i \in F)$	Éta	Phi	Gama	Soma(Def)	Soma[(Def) ²]
01	5	0,02	0,98	0,20	0,01	0,028	0,000
02	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
03	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
04	5	0,02	0,98	0,20	0,03	0,133	0,004
05	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
06	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
07	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
08	169	0,52	0,48	0,09	0,13	21,540	2,857
09	27	0,08	0,92	0,15	0,05	1,399	0,072
10	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
11	14	0,04	0,96	0,14	0,04	0,560	0,022
12	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
13	5	0,02	0,98	0,20	0,00	0,021	0,000
14	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
15	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
16	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
17	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
18	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
19	11	0,03	0,97	0,09	0,22	1,744	0,343
20	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000

Tabela 13. Valores dos critérios de avaliação para a demanda terciária, com a operação conjunta dos reservatórios segundo a regra padrão de decisão.

PC	NF	$P(x_i \in F)$	Éta	Phi	Gama	Soma(Def)	Soma[(Def) ²]
01	5	0,02	0,98	0,20	0,02	0,089	0,002
02	5	0,02	0,98	0,20	0,14	0,664	0,088
03	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
04	5	0,02	0,98	0,20	0,03	0,122	0,003
05	5	0,02	0,98	0,20	0,04	0,210	0,009
06	5	0,02	0,98	0,20	0,38	1,820	0,663
07	5	0,02	0,98	0,20	0,00	0,020	0,000
08	173	0,53	0,47	0,09	0,01	1,593	0,016
09	29	0,09	0,91	0,14	0,40	8,500	2,741
10	5	0,02	0,98	0,20	0,02	0,116	0,003
11	14	0,04	0,96	0,14	0,05	0,586	0,026
12	14	0,04	0,96	0,14	0,10	1,138	0,098
13	5	0,02	0,98	0,20	0,17	0,630	0,087
14	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
15	0	0,00	1,00	1,00	0,00	0,000	0,000
16	6	0,02	0,98	0,17	0,14	0,765	0,099
17	7	0,02	0,98	0,14	0,73	4,374	2,922
18	30	0,09	0,91	0,13	2,69	66,620	282,009
19	30	0,09	0,91	0,13	0,34	9,101	3,090
20	27	0,08	0,92	0,19	0,06	1,642	0,121

Não foi considerada nesta aplicação nenhuma restrição quando à vazão mínima, ou ecológica, a ser garantida no curso do rio Curu. Essa consideração foi feita devido ao fato do rio ser perene apenas em virtude da operação dos reservatórios do sistema. Além disso a legislação estadual específica como de última prioridade a vazão para preservação ecológica (Molinas, 1996).

Para a composição dos valores das funções objetivo disponibilizadas são atribuídos pesos, levando assim o método aplicado a buscar atender as demandas, privilegiando o atendimento àquelas de maior prioridade e mantendo uma reserva hídrica nos reservatórios para operação futura dos mesmos. Esses pesos são controlados pelos usuários dos modelos, através das variáveis P1, P2 e P3 contidas na sub-rotina AVALIASIST. Seus valores são arbitrários e deveriam ser estipulados pelo decisor, ou eventualmente negociados junto ao comitê da bacia. Nesta aplicação os valores utilizados foram arbitrários, buscando caracterizar que a demanda primária é 10 vezes mais relevante que a demanda secundária que por sua vez é 10 vezes mais relevante que a demanda terciária.

Os retornos das demandas foram considerados como sendo disponíveis para o PC imediatamente à jusante daquele onde as mesmas foram supridas, sendo que em PC's localizados no ponto de descarga dos reservatórios considerados, os retornos voltam para o próprio reservatório. Os valores adotados para os mesmos foram os admitidos pela SRH/MMARHAL para projetos no Nordeste e estão resumidos na Tabela 3, assim como o peso atribuído a cada demanda.

Tabela 14. Valores das funções objetivo para o sistema operando de forma conjunta.

Função Objetivo	Valor
FO1	23930
FO2	9,30
FO3	-15,30
FO4	29,50
FO5	-3,10
FO6	3814,780
FO7	963,397

Cenário de estudo

O cenário de estudo escolhido para aplicar a metodologia proposta foi o previsto para o ano de 2020, devido à possibilidade de utilização das projeções das demandas difusa, primária e secundária, contidas no PERH (Ceará, 1992) e no relatório do projeto Aridas (Gondim Filho, 1994). Os valores de demanda difusa são referentes às demandas que estão de tal forma diluídas nas bacias contribuintes de cada PC, que são descontadas diretamente das vazões afluentes aos mesmos, pois, não podem ser adicionadas a nenhuma das ordens de prioridade. Considerou-se que os níveis de demanda para irrigação (demanda terciária) permanecerão os mesmos registrados pelo cadastro dos irrigantes da bacia do rio Curu obtido na Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, sendo esses valores alterados apenas para o PC referente à captação d'água para o Projeto de Irrigação Curu-Paraipá.

ba, já que quando completamente implantado mais que duplicará a sua demanda hídrica (Kemper, 1997). Para compor os valores das demandas para 2020, os modelos multiplicam os valores atuais de demanda pelos valores das escalas de desenvolvimento respectivas. Os dados referentes a essas demandas foram montados através da demanda atual (ver Tabelas 4 e 5) e de valores de escala de desenvolvimento (ver Tabela 6), que são informados no arquivo de entrada de dados para os modelos.

RESULTADOS

Diagnóstico do sistema

Conforme mencionado anteriormente, esta fase teve como objetivo fornecer um diagnóstico do comportamento do sistema de reservatórios da bacia em estudo, conforme os critérios de avaliação incorporados ao

Tabela 15. Valores das funções objetivo para a operação sujeita a parâmetros de racionamento.

		Valores das funções objetivo otimizadas						
		FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
		23806	12,4	-44,3	7,8	-27,0	3537,5	855,8
Valores das funções objetivo fora da otimização	FO1		26954	29081	29965	28989	24228	27685
	FO2	13,3		17,3	17,3	15,1	13,5	17,2
	FO3	-18,5	-16,0		-15,4	-43,1	-17,7	-19,9
	FO4	17,2	17,7	12,3		11,0	16,7	14,2
	FO5	-3,5	-1,8	-25,8	2,7		-2,5	-1,3
	FO6	3540,1	3860,3	4067,9	3882,6	3951,0		3611,5
	FO7	922,5	1039,1	1023,4	1067,7	1000,7	921,0	

Tabela 16. Valores dos parâmetros de racionamento para o açude General Sampaio.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	3,3	49,1	6,6	58,1	5,8	3,9	25,8
Fevereiro	0,5	55,1	42,4	114,3	101,7	0,1	0,1
Março	83,6	55,2	107,5	117,7	105,8	84,2	132,5
Abril	98,0	55,3	65,9	122,3	178,7	98,6	322,2
Mai	225,8	55,3	66,9	118,2	181,1	226,2	322,2
Junho	124,5	55,4	62,2	116,3	126,9	123,8	55,6
Julho	161,8	55,5	63,5	115,1	165,5	158,4	21,3
Agosto	78,9	55,6	67,8	115,1	80,3	79,3	5,1
Setembro	39,7	55,8	63,2	115,1	75,3	40,1	8,4
Outubro	112,2	70,5	38,9	114,3	78,9	118,3	2,1
Novembro	29,1	56,0	62,5	75,0	72,1	27,9	45,7
Dezembro	12,6	56,1	86,3	55,8	37,3	11,4	33,8

Tabela 17. Valores dos parâmetros de racionamento para o açude Pentecoste.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	108,3	56,2	25,1	55,9	12,8	103,2	97,4
Fevereiro	46,2	47,1	130,4	101,8	74,7	46,8	96,6
Março	53,1	47,1	1,9	63,4	10,1	53,8	102,1
Abril	53,7	54,6	50,4	80,4	134,7	54,4	67,4
Mai	61,1	24,9	119,1	75,0	64,9	61,7	113,7
Junho	112,4	52,9	52,2	72,0	35,1	111,0	185,9
Julho	135,0	55,2	124,5	115,1	56,2	134,6	187,8
Agosto	123,0	44,4	21,0	103,6	60,9	123,1	159,9
Setembro	76,0	47,6	22,4	57,3	50,9	74,6	138,8
Outubro	135,0	47,5	92,6	111,5	18,1	133,7	75,6
Novembro	128,3	54,5	34,6	61,6	63,2	126,2	116,6
Dezembro	110,2	54,2	82,9	71,2	64,1	111,1	110,5

Tabela 18. Valores dos parâmetros de racionamento para o açude Caxitoré.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	15,9	55,8	44,1	49,8	49,0	16,5	17,1
Fevereiro	2,1	22,0	177,8	44,9	25,2	4,3	13,8
Março	4,8	48,8	49,8	69,5	49,7	3,7	12,6
Abril	4,9	59,5	129,2	63,9	149,0	3,9	11,8
Maio	3,7	59,1	45,3	71,6	52,2	4,1	9,8
Junho	3,6	48,1	113,2	64,8	116,1	3,7	8,1
Julho	0,6	59,2	39,8	66,9	53,5	0,9	5,9
Agosto	18,4	47,5	38,2	57,9	55,9	18,7	19,7
Setembro	35,7	35,5	32,7	57,9	54,4	35,1	0,4
Outubro	30,4	57,0	25,6	49,1	48,7	29,7	36,4
Novembro	10,2	57,1	12,1	68,6	0,2	10,3	11,6
Dezembro	22,1	48,9	1,0	55,3	53,3	20,9	21,5

Tabela 19. Valores das funções objetivo para a operação sujeita ao zoneamento dos reservatórios.

	Valores das funções objetivo otimizadas							
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7	
	19559	1,3	-55,2	10,1	-51,8	3564,1	926,8	
Valores das funções objetivo fora da otimização	FO1		19737	19822	22674	19731	19594	23850
	FO2	1,3		1,3	3,9	1,3	1,6	8,7
	FO3	-53,5	-55,2		-5,0	-55,2	-36,8	-17,9
	FO4	20,4	21,9	21,3		21,1	20,0	26,5
	FO5	-50,1	-51,7	-51,7	-0,1		-33,2	-6,6
	FO6	3611,2	3753,8	3799,4	4211,3	3778,0		3685,9
	FO7	2855,506	3360,3	3493,3	4863,2	3409,6	2501,4	

PROPAGAR. Nesta fase utilizou-se a regra padrão de decisão para todos os reservatórios do sistema.

Assim, ao ser efetuada a operação dos reservatórios utilizando as duas regras operacionais propostas, tem-se uma resposta de melhora, ou não, do desempenho desse mesmo sistema, levando em consideração a variação dos valores dos mesmos critérios utilizados anteriormente.

Para que os valores das funções objetivo apenas respondessem a essas regras propostas, deixou-se fora da composição dessas funções os valores dos critérios de avaliação dos PC's 03, 08, 14 e 15, pois esses ficam todos a montante dos reservatórios considerados estratégicos neste trabalho. Assim esses PC's não sofrem influência das regras operacionais adotadas para os reservatórios em questão. O diagnóstico, enfim, se desenvolveu em duas fases: Reservatórios operando de forma isolada e reservatórios operando de forma conjunta.

Reservatórios operando de forma isolada

Nesta primeira fase do diagnóstico foi considerado que os reservatórios, utilizando a regra padrão de decisão, operariam tentando atender às demandas dos pontos característicos que estivessem localizados imediatamente à

jusante dos seus respectivos pontos de descarga. Ou seja de acordo com a Figura 4 ter-se-ia que:

- o açude General Sampaio (PC 01) atenderia às demandas dos PC's 01, 02, 04, 05, 06 e 07;
- o açude Tejuçuoca (PC 03) atenderia às demandas do PC 03;
- o açude São Mateus (PC 08) atenderia às demandas do PC 08;
- o açude Pentecoste (PC 09) atenderia às demandas dos PC's 09, 10, 13, 16, 17, 18, 19 e 20;
- o açude Caxitoré (PC 11) atenderia às demandas dos PC's 11 e 12;
- o açude Frios (PC 14) atenderia às demandas dos PC's 14 e 15.

Os resultados dos critérios de avaliação e das funções objetivo, para esse esquema de operação estão resumidos nas Tabelas 7 a 10.

Nestas tabelas tem-se que: NF é o número de falhas; P (x_i ∈ F) é a probabilidade de falhas; Êta é a confiabilidade; Phi é a elasticidade; Gama é a vulnerabilidade; Soma (Def) é o somatório dos déficits; Soma [(Def)²] é o somatório do quadrado dos déficits.

Tabela 20. Valores dos volumes de referência superiores para o açude General Sampaio.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	290,9	312,5	302,5	239,5	297,5	213,3	8,5
Fevereiro	113,7	215,5	202,9	246,2	211,6	110,2	8,5
Março	291,4	312,5	302,5	322,2	297,5	322,2	8,5
Abril	111,5	8,5	8,5	226,9	8,5	144,4	36,3
Mai	96,2	58,9	48,9	260,0	83,9	95,7	103,5
Junho	91,8	150,6	163,2	255,8	156,1	122,9	10,0
Julho	303,2	284,9	272,3	221,1	275,5	301,1	8,5
Agosto	112,3	70,4	83,7	322,2	90,7	87,4	8,5
Setembro	165,4	230,0	322,2	223,8	213,7	211,5	44,8
Outubro	186,5	176,0	163,4	262,0	162,3	177,3	45,0
Novembro	98,1	8,5	8,5	250,3	31,4	8,5	10,5
Dezembro	167,5	191,1	178,5	249,0	190,9	147,1	8,5

Tabela 21. Valores dos volumes de referência superiores para o açude Pentecoste.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	288,1	386,1	376,1	395,6	371,1	288,2	18,5
Fevereiro	148,7	199,7	230,1	395,6	193,8	147,3	18,5
Março	131,4	386,1	376,1	395,6	371,1	136,4	18,5
Abril	167,5	203,7	193,7	296,8	188,7	175,1	18,5
Mai	364,1	248,8	227,4	395,6	395,0	344,2	228,7
Junho	220,1	247,1	238,9	298,9	240,1	207,8	18,5
Julho	227,6	374,5	361,9	360,1	395,3	190,3	18,5
Agosto	151,1	157,8	145,8	298,7	151,4	199,1	18,5
Setembro	177,0	214,8	223,9	287,4	172,5	153,7	18,5
Outubro	125,4	159,3	171,3	254,0	128,7	130,5	18,5
Novembro	118,6	125,1	125,3	230,5	118,2	117,5	18,5
Dezembro	170,9	287,6	284,3	244,7	285,2	126,6	18,5

Reservatórios operando de forma conjunta

Nesta Segunda fase do diagnóstico foi considerado que os reservatórios cujas capacidades fossem superiores à 100 hm³ operariam de forma conjunta, parcelando a responsabilidade de atendimento à demanda de acordo com as suas localizações e com o seu nível de armazenamento no início de cada intervalo de simulação. Todos ainda utilizando a regra padrão de decisão.

Assim em cada intervalo de simulação ter-se-ia uma matriz de parcelamento com o seguinte esquema de atendimento às demandas:

- os PC's 01, 02, 04, 05, 06 e 07 são exclusivamente atendidos pelo açude General Sampaio (PC 01);
- o PC 09 é atendido exclusivamente pelo reservatório Pentecoste (PC 09);
- o PC 10 é atendido, conforme parcelamento, pelos açudes General Sampaio (PC 01) e Pentecoste (PC 09);
- os PC's 11 e 12 são atendidos exclusivamente pelo açude Caxitoré (PC 11);
- os PC's 13, 16, 17, 18, 19 e 20 são atendidos, conforme parcelamento, pelos reservatórios General Sampaio (PC 01), Pentecoste (PC 09) e Caxitoré (PC 11);
- o PC 03 é atendido exclusivamente pelo açude Tejuçuoca (PC 03);
- o PC 08 é atendido exclusivamente pelo açude São Mateus (PC 08);
- Os PC's 14 e 15 são atendidos exclusivamente pelo açude Frios (PC 14).

Os resultados dos critérios de avaliação e das funções objetivo, para esse esquema de operação conjunta estão resumidos nas Tabelas 11 a 14.

Comparando os resultados descritos nas Tabelas 10 e 14 verifica-se que a operação em conjunto dos reservatórios já é suficiente para melhorar o valor da maioria das Funções Objetivo disponibilizadas, só havendo uma piora

Tabela 22. Valores dos volumes de referência superiores para o açude Caxitoré.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	202,0	202,0	202,0	153,6	202,0	177,0	12,44
Fevereiro	86,0	97,3	103,5	130,2	77,3	70,9	7,5
Março	73,0	130,5	117,9	199,0	116,8	71,6	16,6
Abril	105,6	99,2	105,4	151,6	112,6	108,7	60,0
Maio	118,4	77,5	96,3	136,2	105,7	125,7	7,5
Junho	111,1	126,7	114,1	139,3	113,0	106,1	7,5
Julho	178,3	181,9	169,3	179,9	163,0	159,9	82,8
Agosto	96,4	115,1	107,6	185,1	113,2	105,1	7,5
Setembro	95,6	104,4	91,8	165,7	92,0	90,4	35,0
Outubro	86,0	90,7	80,3	148,6	87,1	88,0	42,5
Novembro	83,5	76,5	92,0	199,0	92,2	79,8	30,0
Dezembro	104,6	137,3	126,1	153,9	160,4	107,3	7,5

Tabela 23. Valores dos volumes de referência inferiores para o açude General Sampaio.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	8,5	8,5	8,5	160,8	8,5	8,5	8,5
Fevereiro	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Março	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Abril	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Maio	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Junho	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Julho	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Agosto	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Setembro	8,5	8,5	8,5	124,0	8,5	8,5	8,5
Outubro	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Novembro	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Dezembro	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5

para o valor da FO 4, ou seja, do somatório ponderado das maiores vulnerabilidades observadas. Esse fato é explicado devido a pior vulnerabilidade da demanda primária (Tabela 7) ocorrer no PC 09 correspondente ao açude Pentecoste, quando o sistema opera desagregado (de forma isolada). Neste caso, apesar desse açude ser o de maior capacidade, ele seria responsável pelo atendimento exclusivo dos PC's 09, 10, 13 e 16 a 20. Já na operação em conjunto, a pior vulnerabilidade da demanda primária passa a ser verificada no PC 11 (Tabela 11), correspondente ao açude Caxitoré. Este açude, por sua vez, na operação conjunta tem a sua responsabilidade de suprimento aumentada para a parcela de sua responsabilidade de atendimento, dos PC's 13 e 16 a 20.

Assim, ao compor o valor da função objetivo 4 o método ignora, devido aos fatores de ponderação adotados, que a pior vulnerabilidade da demanda terciária observada para o sistema (no PC 18) tem o seu valor reduzido em mais da metade, devido à mudança da operação desagregada para a operação conjunta dos reservatórios (ver Tabelas 9 e 13).

Resultados da operação com a regra padrão de decisão modificada

O processo de otimização foi efetuado para as sete funções objetivo disponibilizadas. Os valores encontrados para cada uma delas apresentam-se na Tabela 15, como também os valores das demais funções, que estavam fora do processo, em cada momento.

Nas Tabelas 16, 17 e 18 são apresentados os valores dos parâmetros mensais da regra padrão de decisão modificada, encontrados para cada um dos reservatórios estratégicos da bacia.

Resultados da operação com a regra de zoneamento dos reservatórios

O processo de otimização foi efetuado para as sete funções objetivo disponibilizadas. Os valores encontrados para cada uma delas apresentam-se na Tabela 19, como também os valores das demais funções, que estavam fora

Tabela 24. Valores dos volumes de referência inferiores para o açude Pentecoste.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Fevereiro	18,5	18,5	18,5	112,8	18,5	18,5	18,5
Março	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Abril	18,5	18,5	18,5	93,7	18,5	18,5	18,5
Mai	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Junho	18,5	18,5	18,5	154,5	18,5	18,5	18,5
Julho	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Agosto	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Setembro	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Outubro	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Novembro	18,5	18,5	18,5	57,0	18,5	18,5	18,5
Dezembro	18,5	18,5	18,5	161,4	18,5	18,5	18,5

Tabela 25. Valores dos volumes de referência inferiores para o açude Caxitoré.

Meses	Valores dos parâmetros para cada função objetivo otimizada (hm ³)						
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
Janeiro	7,5	7,5	7,5	130,0	7,5	7,5	7,5
Fevereiro	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Março	7,5	7,5	7,5	49,3	7,5	7,5	7,5
Abril	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	60,0
Mai	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Junho	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Julho	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Agosto	7,5	7,5	7,5	120,7	7,5	7,5	7,5
Setembro	7,5	7,5	7,5	98,4	7,5	7,5	25,0
Outubro	7,5	7,5	7,5	105,9	7,5	7,5	20,2
Novembro	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	25,0
Dezembro	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5

do processo, em cada momento. As Tabelas 20 a 25 apresentam os valores dos níveis de referência (armazenamentos), mínimo e máximo, para cada reservatório estratégico da bacia.

De acordo com os valores descritos nas Tabelas 23 a 25, observou-se que, para a maioria das funções objetivo utilizadas, os níveis estratégicos inferiores (ou armazenamentos de referência) tenderam a não existir. Ou seja, seus valores se igualaram aos valores dos respectivos volumes mortos de cada reservatório estratégico. Isso significa que, por essa metodologia, seria suficiente o racionamento apenas da demanda de prioridade terciária, ou seja, a adoção de apenas um nível estratégico com os reservatórios sujeitos a apenas duas zonas, sendo na primeira todas as demandas atendidas e na segunda a demanda terciária racionada.

Análise dos resultados para cada função objetivo disponibilizada

Finalmente para analisar os resultados comparativos das funções objetivo, utilizou-se a Tabela 26 com os valo-

res destas, de acordo com a alternativa de operação dos reservatórios empregada. Essas metodologias, já anteriormente expostas, foram:

1. Alternativa A: operação isolada dos reservatórios da bacia, segundo a regra padrão de decisão.
2. Alternativa B: operação conjunta dos reservatórios, segundo a regra padrão de decisão.
3. Alternativa C: operação conjunta dos reservatórios, sendo os reservatórios estratégicos operados segundo a regra padrão de decisão modificada.
4. Alternativa D: operação conjunta dos reservatórios, sendo os reservatórios estratégicos operados segundo a regra de zoneamento.

Nesta tabela são evidenciados os melhores valores obtidos para cada função objetivo, com a alternativa correspondente. Ou seja, os valores mínimos das funções objetivo 1, 2, 3 e 5 foram obtidos com a alternativa de operação segundo a regra de zoneamento (Alternativa D), e os valores mínimos das funções objetivo 4, 6 e 7 foram

Tabela 26. Comparação entre os valores das funções objetivo disponibilizadas para cada uma das alternativas de operação dos reservatórios.

Alternativa	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7
A	38149	31,8	-14,5	24,8	19,8	5753,2	4150,2
B	23930	9,3	-15,3	29,5	-3,1	3814,8	963,4
C	23806	12,4	-44,3	7,8	-27,0	3537,5	855,8
D	19559	1,3	-55,2	10,1	-51,8	3564,1	926,8

obtidos com a alternativa de operação segundo a regra padrão de decisão modificada (Alternativa C).

DISCUSSÃO

Os modelos de propagação e operação de reservatórios desenvolvidos adquiriram as características necessárias para serem consideradas como uma excelente opção de sistema de apoio à decisão, mostrando-se capazes de avaliar o desempenho do sistema, conforme os critérios de avaliação implementados. Segundo esses critérios, se torna possível informar aos irrigantes e à população em geral o número de falhas, a confiabilidade, a elasticidade, a vulnerabilidade, o somatório dos déficits e o somatório do quadrado dos déficits, de cada ponto característico, para as demandas hídricas pré-definidas.

O diagnóstico da operação dos reservatórios submetidos à regra padrão de decisão, mostrou que apenas a operação conjunta dos três reservatórios considerados estratégicos já é, por si só, superior à opção de operar o sistema de forma isolada. As novas regras de operação (regra padrão de decisão modificada e regra do zoneamento dos reservatórios) mostraram-se eficientes e superiores à regra padrão de decisão, de acordo com os critérios de avaliação propostos. Para as FO 1, 2, 3 e 5 a regra com níveis de racionamento se mostrou mais eficiente, apesar de impor um racionamento muito severo na demanda de prioridade terciária. Já a regra padrão modificada mostrou-se mais eficiente para as FO 4, 6 e 7, sem a necessidade de racionamentos severos na demanda de prioridade terciária.

O que se conclui, comparando estas regras (regra padrão de decisão modificada e regra do zoneamento dos reservatórios) é que a primeira estabelece racionamentos mais graduais, que são intensificados com o rebaixamento dos níveis das reservas hídricas. A regra de zoneamento é menos gradual, pois, tão logo as reservas atinjam dado nível, determinada demanda passa a não ser atendida. No entanto, poder-se-ia estabelecer uma maior gradação na regra de zoneamento estabelecendo vários níveis ou zonas que determinariam racionamento de percentuais das demandas. Por exemplo, quando as reservas atingirem uma determinada zona, atende-se apenas 75% da demanda; havendo maior rebaixamento, atender-se-ia apenas 50% e assim por diante. Esta alternativa peca por aumentar o número dos parâmetros a serem otimizados na regra decisória, mas permite um melhor controle de que parte da demanda estará sendo submetida a racionamentos.

As funções objetivo aplicadas quantificam com óticas distintas os resultados da operação. Por isso, dependendo da função, os parâmetros calibrados das regras decisórias são distintos. Não é possível estabelecer uma função objetivo que seja melhor ou mais adequada ao problema. Cada uma estabelece um objetivo operacional (minimizar o número de falhas sem se importar com a sua magnitude, por exemplo) que é desejável. Mas a otimização desse objetivo é realizada com prejuízos para outros critérios igualmente desejáveis (minimizar a soma dos valores das falhas, por exemplo). A operação de uma reservatório é, portanto, um problema em que podem estar presentes e serem considerados múltiplos objetivos. Poderá haver necessidade de serem adotadas técnicas de Análise Multi-Objetivo para definir a solução a ser implementada. Esta pesquisa não entrou neste detalhamento, embora ele seja obviamente importante.

Os pesos atribuídos às composições das funções objetivo utilizadas foram arbitrários. Buscou-se atribuir um contraste logarítmico (100, 10 e 1) apenas para caracterizar que a demanda primária é 10 vezes mais relevante que a demanda secundária que por sua vez é 10 vezes mais relevante que a demanda terciária. Este pode não ser o caso. Os pesos a serem adotados na prática deverão ser objeto de negociação entre os decisores, eventualmente reunidos em um comitê da bacia do rio Curu, ou serem obtidos em função de uma avaliação econômica da relevância de cada demanda. Métodos de valoração econômica, desenvolvidos na Economia Ambiental, poderão ser usados para tornar mais objetiva esta ponderação. Obviamente, os resultados deverão variar com a ponderação adotada.

CONCLUSÃO

Este trabalho mostra que existem várias alternativas de formatação da regra operacional de um sistema de múltiplos reservatórios que atende a múltiplos usos. Elas podem ser usadas com maior ou menor eficiência para a otimização de diversas alternativas de funções objetivo. Nenhuma das regras ou das funções objetivo podem ser escolhidas, a priori, como mais indicadas. Cada situação determinará as escolhas mais adequadas, sendo essas decisões de caráter político. O que fica evidenciado é que a abordagem determinística, desenvolvida nesse trabalho, pode ser utilizada para gerar as análises que subsidiarão as escolhas dos decisores. Especialmente, a técnica de otimi-

zação de regras operacionais pré-formadas, com o uso da otimização iterativa da simulação do sistema permite alcançar eficiência computacional na derivação do ótimo sem comprometer a representação do sistema, na sua complexidade característica de sistemas com múltiplos reservatórios e usos.

REFERÊNCIAS

- CEARÁ - SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS (1992). *Plano Estadual dos Recursos Hídricos: Ceará*. Fortaleza: SRH. 5 vol. em 4.
- CHAVES, E. M. (1993). *Proposta para o planejamento da bacia do rio Mosquito no norte de Minas Gerais*. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 221f. Dissertação (Mestrado).
- FREITAS, N. N. (1996). *Um diagnóstico da utilização dos conceitos de sistema de apoio à decisão para gerenciar recursos hídricos*. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 191f. Dissertação (Mestrado).
- GONDIM FILHO, J. G. C. (1994). *Sustentabilidade do desenvolvimento do semi-árido sob o ponto de vista dos recursos hídricos: versão final*. Brasília: Projeto Áridas. 104f.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R. & LOUCKS, D. P. (1982). Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, Washington, vol. 18, nº1, p.14-20, Feb.
- KEMPER, K. E. (1997). *O custo da água gratuita: alocação e uso dos recursos hídricos no Vale do Curu, Ceará, nordeste brasileiro*. Linköping: Linköping University. 236p.
- LANNA, A. E. (1993). *Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacias Hidrográficas - SAGBAH: informe geral, manual do usuário*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.
- LANNA, A. E. e SCHWARZBACH, M. (1989). MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-calibrável. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 55p. (*Recursos Hídricos. Publicação nº21*).
- MOLINAS, P. A. (1996). A gestão dos recursos hídricos no semi-árido nordestino: a experiência cearense. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, São Paulo, vol. 1, nº1, p.67-88.
- PEREIRA, J. S. (1996). *Análise de critérios de outorga e de cobrança pelo uso da água na bacia do rio dos Sinos, RS*. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 109f. Dissertação (Mestrado).
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS: ABRH. 669p.
- VIANNA Jr., W. P. (1998). *Operação ótima do sistema de reservatórios da bacia do rio Curu – CE*. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 120f. Dissertação (Mestrado).

Simulation and Optimization of Reservoirs System Operation: the Curu River Basin

ABSTRACT

Over most of the Brazilian Northeast, the occurrence of frequent periods of dryness hampers economic and subsistence activities, causing people to leave rural areas and concentrate in large urban centers. Reservoir operation, depending on the multiple purposes of the system, attempts to increase storage during periods of water surplus to use it during periods of shortage.

In this study three operational rules are used for reservoirs: standard rule of decision, standard modified rule of decision and reservoir zoning. The value of the parameters for the second and third rules were obtained through an iterative optimization procedure, that simulates the propagation of the flow in a water resources system. Six criteria are used to evaluate system performance in each simulation: - reliability, resilience, vulnerability, number of flaws, sum of the deficits and sum of the square of the deficits.

A priority criterion to fulfil the water demands was adopted, ranking them into three classes: first, second and third classes.

The proposed methodology was applied to the Curu river basin, in Ceará, with a system including six large reservoirs, three of which are considered strategic in the present study.

Key Words: simulation; reservoirs; optimization.