

# MÉTODOS MULTICRITÉRIOS COMO AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURU – ESTADO DO CEARÁ

Raimundo Wilson Gonçalves<sup>1</sup>, Plácido Rogério Pinheiro<sup>2</sup> & Marcos Airton de Sousa Freitas<sup>3</sup>

**Resumo** - A decisão sobre a liberação das vazões dos açudes de uma bacia hidrográfica para um período vindouro, envolve grandes dificuldades compostas de aspectos hidrológicos, sociais, políticos e econômicos. Os métodos multicritérios são técnicas de apoio à decisão, que ajudam a solucionar problemas que possuem vários objetivos frequentemente conflitantes, com múltiplas ações possíveis, incertezas, várias etapas, e diversos indivíduos afetados pela decisão. Este estudo combina a pesquisa operacional e a análise multicritério como instrumento de decisão para os participantes do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Curu. O presente trabalho descreve e aplica os métodos multicritérios ELECTRE I e Programação de Compromissos. Estes dois métodos são aplicados e comparados em um estudo de caso, tendo como objetivo estratégico a escolha da vazão adequada, atendendo a diversos critérios envolvidos no processo. Alguns dados foram obtidos a partir da otimização das áreas irrigadas de determinados perímetros, usando as alternativas de vazões simuladas pela COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará), usando um modelo de programação linear.

**Abstract** - The decision about the liberation of the flows of the dams of a basin for a coming period, involves great difficulties composed of hydrological, social, political and economical aspects. The multicriteria methods are frequently support techniques to the decision, that help to solve problems that possess several conflicting objectives, with multiple possible actions, uncertainties, diverse stages, and several affected individuals. This study combines operational research and multicriteria analysis as instrument of decision for the participants of the Committee of Rio Curu's Basin. This work describes and applies the multicriteria methods ELECTRE I and Compromise Programming. These two methods are applied and compared in a case study, with strategic objective the choice of the appropriate flow, assisting to several criteria involved in the process. Some data were obtained starting from the optimization of the areas irrigated certain perimeters using the alternatives of simulated flows

---

<sup>1</sup> Mestrado em Informática Aplicada (MIA) – UNIFOR; M.Sc., Prof. Adjunto da UECE.

<sup>2</sup> Coordenador do Mestrado em Informática Aplicada (MIA) da UNIFOR; D.Sc. (UFRJ), Prof. Titular da UNIFOR.

<sup>3</sup> Prof. UNIFOR; M.Sc. (UFC); doutorando Universidade de Hannover (Alemanha); atualmente na Agência Nacional de Águas (ANA).

for the technicians of COGERH (Company of Administration of the Recursos Hídricos of the State of Ceará), through a model of lineal programming.

**Palavras-chave** – Multicritério; Método Electre; Programação de Compromissos.

## **1. INTRODUÇÃO**

A inclusão de múltiplos objetivos nos processos de planejamento público, superando os processos monocritérios, via de regra o critério econômico, está tornando-se uma prática comum nas esferas federal, estadual e municipal.

Os métodos multicritérios de apoio à decisão têm ajudado os agentes de decisão em todos os níveis a melhorar a qualidade de vida no planeta. Problemas com decisões complexas normalmente são associados a uma análise multicritério. Os elementos fundamentais que estão presentes nos processos de decisão são os seguintes: 1) Obter respostas às perguntas enfrentadas por um decisor em um processo de decisão; 2) Tornar transparente toda potencial decisão; 3) Aumentar a coerência entre a evolução de um processo de decisão, os objetivos, e o sistema de valor do processo.

Até recentemente, as iniciativas de planejamento e gestão do uso dos recursos hídricos foram caracterizadas pelo uso de horizontes de análise de curto e médio prazo pela hegemonia técnico-institucional na tomada de decisões, pela setorização da gestão e pela relativa facilidade de financiamento de projetos públicos e privados. Neste contexto, a Análise Custo/Benefício exercia adequadamente o papel de instrumento suficiente de análise. Entretanto, este modelo de planejamento e gestão mostrou-se incapaz de produzir os resultados esperados, em função da crescente degradação ambiental causada e o conseqüente aumento das externalidades econômicas, dos prejuízos ao bem-estar social e da insatisfação popular, do aumento do conflito entre os diversos setores usuários da água e de uma sucessão de crises econômicas.

Objetiva-se com este trabalho desenvolver o estudo da alternativa análise multicritério como instrumento de decisão para os participantes do Comitê da Bacia do Rio Curu, uma importante região agrícola do Ceará, em termos de produção baseada na irrigação.

## **2. OS MÉTODOS MULTICRITÉRIOS E A TOMADA DE DECISÃO**

Foi durante a década de 60 que os métodos de análise multicritério tiveram um desenvolvimento significativo, surgindo várias escolas de pesquisadores, com várias técnicas novas e diferentes atitudes

de apoio aos novos modos de tomar decisões. Uma destas escolas é a “Escola Européia” intitulada “Multicriteria Aid for Decisions” (Roy & Vanderpooten, 1997). De uma maneira geral, na década de 60, apesar do desenvolvimento de novas técnicas, a realidade econômica ditada por mercados estáveis e economia de escala, as transformações sociais que começavam a ocorrer na época não pareciam exigir um maior grau de flexibilidade das organizações. Por este motivo, os processos de tomada de decisão não necessitavam de outra preocupação dos gerentes, que não a busca pela eficiência produtiva das empresas.

Ao recomendar as atitudes de um decisor face a uma situação de decisão Keeney (Keeney, 1988) aconselha o decisor a pensar primeiramente sobre os seus valores, para em seguida listar os seus desejos em relação ao contexto da decisão (Guitouni & Martel, 1998). Identificados os objetivos, cabe agora examinar o seu conteúdo. Com isso, os valores do decisor seriam identificados pelo questionamento do significado e da razão de cada objetivo. Se os objetivos estão incompletos, ou não definidos claramente, a avaliação das alternativas provavelmente não será tão útil.

### **3. OS MÉTODOS ELECTRE I E A PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO**

Neste trabalho foram utilizados os métodos multicritérios e programação linear. A técnica de pesquisa operacional denominada Programação Linear é usada para determinar quais as máximas áreas irrigadas que podemos obter com as vazões liberadas. No âmbito decisório utilizamos as técnicas de análise multiobjetivo seguintes:

- O método ELECTRE I (ELimination Et Choix Traduisant la REalité), como exemplo de técnica com manifestação antecipada de preferências,
- O método Programação de Compromisso, como exemplo de técnica com articulação progressiva de preferências.

#### **3.1 O Método ELECTRE I**

O método ELECTRE foi concebido para uma abordagem multiobjetivo, podendo ser aplicado na solução de problemas de gestão de recursos hídricos, caracterizados por alternativas avaliadas por critérios preferencialmente qualitativos, com fixação prévia das preferências, por parte dos decisores.

A metodologia desenvolvida por Benayoun & Tergny (1969) e Roy (1971), sustenta-se em três conceitos fundamentais: concordância, discordância e valores-limite (“outranking”), utilizando um intervalo de escala no estabelecimento das relações-de-troca na comparação aos pares das alternativas.

O método baseia-se na separação do conjunto das alternativas da solução, daquelas que são as preferidas na maioria dos critérios de avaliação, sem causar um nível de descontentamento inaceitável para qualquer um dos critérios fixados. A partir da matriz de avaliação, as alternativas são comparadas, aos pares, com base em relações de preferência.

$a > b$  significa que a alternativa  $a$  é preferida à alternativa  $b$

$a = b$  significa que  $a$  é equivalente à  $b$

É importante ressaltar que o processo admite a intransitividade nas relações de preferência, com base no fato de que os critérios de estabelecimento das preferências podem ser diferentes.

A concordância entre duas alternativas  $i$  e  $j$  é uma medida ponderada do número de critérios sob os quais a alternativa  $i$  é preferida ou equivalente à alternativa  $j$ .

O índice de concordância é calculado pela seguinte fórmula:

$$C(i, j) = \frac{\sum [w(k') + 1/2w(k'')] }{\sum w(p)} ; 0 \leq C(i, j) \leq 1.$$

Sendo:

$w(k')$  = pesos dos critérios sob os quais  $i > j$ ;  $w(k'')$  = pesos dos critérios sob os quais  $i = j$ ;  
 $w(p)$  = pesos de todos os critérios.

Para maior clareza, os índices de concordância são apresentados na forma de uma matriz de concordância, onde  $C(i, j)$  representa o elemento da linha  $i$  e coluna  $j$ , ou seja, a satisfação que o decisor sente ao preferir a alternativa  $i$  frente à alternativa  $j$ , sob certo critério.

O índice de discordância  $D(i, j)$  representa o desconforto sentido pelo decisor ao escolher a alternativa  $i$  frente à alternativa  $j$ . Para o estabelecimento da matriz de discordância, inicialmente é definida uma escala numérica comum para todos os critérios, sendo que cada critério deve ter um intervalo de escala diferente. A escala é usada para comparar o desconforto causado entre o menor valor numérico (pior escolha) e o maior valor numérico (melhor escolha) de cada critério para cada par de alternativas.

Essa escala comum é usada para medir o desconforto que o decisor sente ao preferir a alternativa  $i$  à alternativa  $j$ , considerados todos os critérios. O maior valor da escala numérica comum define o critério sob o qual o decisor sente o maior desconforto ao mudar de nível, quando estabelece seu juízo de valor, em termos de preferência manifesta.

Sintetizando, os valores entre um e zero ( $p, q$ ), contidos nas matrizes de concordância e discordância, são determinados pelos decisores ao avaliarem as alternativas, aos pares, sob os critérios de análise fixados. Assim, tem-se que  $p = 1$  significa concordância plena, quando a alternativa  $i$  é

preferida à alternativa  $j$  sob todos os critérios. (na matriz de concordância). A condição  $q = 0$  significa sem discordância (na matriz de discordância).

Uma vez definidas as matrizes de concordância e discordância, passa-se para uma segunda fase, fixando-se valores limites para  $p$  (índice mínimo de concordância) e  $q$  (índice máximo de discordância). Por meio desse procedimento, conhecido como filtragem, separam-se as alternativas não dominadas que atendem, simultaneamente, os limites fixados para  $p$  e  $q$ , mas sem a classificação dessas. Essa seleção preliminar das alternativas de maior atratividade, a partir da fixação dos valores limites para  $p$  e  $q$ , pode ser representada graficamente.

Os critérios para a fixação dos parâmetros  $p$  e  $q$ , com base na estrutura de preferências de cada problema multiobjetivo, são de livre escolha dos decisores que podem para isto fazer uso da estatística ou da experiência pessoal.

### 3.2 Método da Programação de Compromisso

O Método da Programação de Compromisso (Zeleny, 1973) caracteriza-se por ser um processo iterativo, geralmente com o estabelecimento progressivo das preferências por parte do decisor, até que seja atingida uma solução satisfatória. Há situações em que os pesos dos critérios de avaliação decorrem da estrutura do problema.

O método classifica as alternativas não dominadas através de um conceito geométrico do melhor, por meio de uma medida de distância até a solução ideal. Dada a matriz de avaliação das alternativas de solução do problema, segundo os critérios estabelecidos, a solução ideal pode ser definida como o vetor  $Z_i^* = (Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_p^*)$ , no qual as funções  $Z_i^*$  são as soluções do problema:

$$\text{máx } Z_i(x),$$

$$\text{sujeito a: } x \in X \text{ e } i = 1, 2, \dots, p$$

onde :

$x$  é o vetor de decisões;  $p$  o número de critérios;  $X$  o conjunto das soluções viáveis e  $Z_i(x)$  a função-objetivo para o critério  $i$ .

A *solução ideal* é, geralmente, inatingível (por pressupor a solução ótima para todos os objetivos através de uma alternativa) e serve como padrão de referência no processo de classificação das soluções *não-dominadas*. Essa classificação é obtida pela determinação da proximidade de cada alternativa *não-dominada* com relação à solução ideal. Uma das medidas de proximidade mais usadas é a que segue:

$$L_i = \left\{ \sum_{i=1}^p \alpha_i^s [z_i^* - z_i(x)]^s \right\}^{\frac{1}{2}}$$

onde:

$1 \leq s \leq \infty$  e  $i$ , índices dos pesos dos critérios, fixados subjetivamente pelos decisores, ou derivados da estrutura de preferências decorrentes do problema .

A solução de compromisso  $x_s$  para um dado  $s$  é:

$$\text{Min } L_s(x) = L_s(x^*)$$

sujeito a:  $x \in X$

O termo  $[z_i^* - z_i(x)]$  é uma medida de desvio da solução ideal.

A determinação do conjunto das soluções de compromisso é obtida resolvendo-se a função acima para valores dados aos pesos  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$  e para  $1 \leq s \leq \infty$ . Operacionalmente, são calculados três pontos do conjunto das soluções de compromisso, correspondentes a  $s = 1, 2$  e  $\infty$ .

A solução de melhor compromisso é caracterizada pelo vetor dos melhores valores alcançados em cada critério da matriz de avaliação.

Ou seja:

$$L_s(x_s^*) = \min L_s(x_s) = \min \left\{ \sum_{i=1}^p \alpha_i^s \left[ \frac{z_i^* - z_i(x)}{z_i^* - z_i^{**}} \right]^s \right\}^{1/s}$$

Da mesma forma, a pior solução será considerada aquela dada pelo vetor dos piores valores da matriz de avaliação. Finalmente, com estes valores e os parâmetros  $s$  e  $\alpha$ , calcula-se a distância de cada alternativa até a solução ideal. A alternativa que apresentar a menor distância é a solução de melhor compromisso.

Como já foi referido, a Programação de Compromisso é um método iterativo. Quando os decisores se derem por satisfeitos, o algoritmo acaba. Caso contrário, variam-se os pesos dos critérios e o parâmetro  $s$ , por via de consequência as soluções ideais, processando-se novamente o algoritmo, até que seja encontrada uma solução satisfatória para os decisores.

#### 4. APLICAÇÃO À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURU

Existem vários fatores que tornam o processo decisório complexo como o atendimento ao uso múltiplo das águas, a subjetividade de alguns agentes envolvidos, as incertezas dos eventos

hidrológicos, dos processos econômicos, sociais e ambientais, como também a consideração de aspectos de difícil mensuração, como o bem estar social, a preservação do ambiente, as questões culturais e estéticas, e a consideração dos aspectos econômicos.

Ao analisar os relatórios das reuniões realizadas desde a fundação do Comitê da Bacia do Curu, no estado do Ceará, além de participar de uma delas, constatou-se a dificuldade do processo decisório. As decisões tomadas são restritas apenas a que vazões devem ser liberadas pelos açudes componentes da bacia no intuito da regularização do rio, propiciando o uso múltiplo das águas, atendendo, na medida do possível, às vazões requeridas pelos outorgantes e pelo órgão responsável pelo abastecimento da água à população, sem um estudo mais aprofundado sobre as conseqüências desta decisão.

Foi desenvolvido, então, um sistema de apoio à decisão que engloba duas técnicas multicritérios que permitem ajudar no processo de tomada de decisões nos Comitês. Estes métodos foram aplicados e comparados em um estudo de caso, para suporte à decisão ao Comitê da Bacia do Curu, tendo como objetivo o desenvolvimento sustentável, e o atendimento às necessidades múltiplas do uso das águas.

No caso, estudadas as alternativas, ou seja, as possíveis vazões oriundas de simulações executadas pelo órgão gestor, e critérios que representam os impactos resultantes da escolha da alternativa valores obtidos usando programação linear, ou provenientes da eleição do grau de preferência dos participantes do Comitê. Foram escolhidos entre diversas técnicas os métodos ELECTRE, (Benayoun & Tergny, 1969, e Roy, 1971), e Programação de Compromisso (Zeleny, 1973). Tanto o método ELECTRE I, quanto o de Programação de Compromisso, permitem a decisão em grupo e a introdução de fatores subjetivos.

#### **4.1 Descrição da Bacia**

A Bacia do Rio Curu conta com uma capacidade máxima de armazenamento de 1.062.362.014 m<sup>3</sup> de água distribuída entre seus 12 (doze) açudes monitorados pela COGERH. É uma das mais exploradas do estado, tanto no aspecto hidrológico, com seus principais rios barrados por grandes açudes públicos, como no aspecto hidroagrícola, devido à existência de projetos públicos e privados de irrigação, cuja área supera os 7.000 ha.

A bacia do rio Curu é no momento, entre as grandes bacias do Estado, a que apresenta maior índice de controle, atingindo 76% da sua área de drenagem, através de seus três maiores reservatórios públicos: General Sampaio, Pereira de Miranda e Caxitoré. Na bacia do Curu foram construídos também três pequenos reservatórios públicos que são os açudes de São Mateus (10x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), Salão (6x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) e São Miguel (1,5x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) e um grande número de pequenos barramentos particulares, sem

nenhum controle pelos órgãos públicos e que podem vir num futuro próximo, a reduzir substancialmente os volumes afluentes aos reservatórios públicos da região.

A utilização das águas acumuladas nos principais reservatórios da bacia, para fins múltiplos, conforme preconizado na lei 9.433/97 (Lei das Águas), é uma idéia que vem sendo posta em prática na região. Os reservatórios foram operados, até então, sem a preocupação de otimizar essa utilização. Este fato decorria notadamente da sub-utilização dos reservatórios. A partir do expressivo aumento verificado na área irrigada na bacia, após entrar em operação o Projeto de Irrigação Curu-Paraipaba, localizado ao final do trecho irrigado da bacia, começaram a aparecer os naturais conflitos entre os diversos usos da água. Os principais usos das águas acumuladas nos reservatórios da região são os seguintes: abastecimento humano e dessedentação animal, piscicultura e irrigação, sendo esta última enfatizada em nosso estudo de caso.

Os rios da região semi-árida caracterizam-se por pararem de escoar praticamente um mês após cessarem as chuvas. Esse caráter intermitente obriga a construção de reservatórios públicos e privados. A evaporação é a principal consumidora das águas acumuladas nos reservatórios da região semi-árida. A maneira mais eficiente para reduzir as perdas por evaporação é a adoção de uma política mais agressiva para a utilização de suas águas, principalmente na irrigação. Entretanto, essa utilização mais intensa aumenta substancialmente a probabilidade da ocorrência de falhas no atendimento às demandas.

Assim tem-se que fixar o risco de falha que se está disposto a correr no atendimento das demandas. Usualmente é fixada uma garantia de 90% para o atendimento das atividades agrícolas e de 95 a 100% para o abastecimento de cidades. Nos períodos de seca (como as de 1979 e 1983) os reservatórios da bacia praticamente secam, originando graves problemas ao atendimento das necessidades de água para o abastecimento humano e irrigação.

Principal uso das águas acumuladas nos reservatórios a irrigação é a maior fonte de renda dos moradores dos municípios banhados pelo Rio Curu. Os principais perímetros irrigados são: 1) Faisa com 290 ha; 2) Curu-Paraipaba com 2565 ha; 3) Ypioca: 1085 ha; 4) Curu-Recuperação: 940 ha.

É a maior preocupação dos gestores de recursos hídricos, sendo de fundamental importância que haja um volume mínimo ao final de cada estação, a fim de garantir o abastecimento humano e animal com boa qualidade de água para o período vindouro.

O aproveitamento de um reservatório para criação de peixe constitui-se em um uso não consuntivo para as suas águas. Contudo, origina restrições em sua operação, provocadas pela necessidade da manutenção de uma reserva mínima adequada. Essas restrições se agravam na região semi-árida, devido à incidência de prolongados períodos de seca, onde praticamente secam os pequenos



e médios reservatórios. Os principais reservatórios da bacia são grandes produtores de peixes, sendo a região um dos mais importantes centros ictiológicos do Nordeste do Brasil.

O sistema de reservatórios da bacia do rio Curu é composto pelos três grandes reservatórios existentes (General Sampaio, Pereira de Miranda e Caxitoré) e pelos reservatórios programados (Frios, Melancia, Paulo e Tejuçuoca). Os reservatórios construídos, juntamente com os programados, formam um complexo sistema representado esquematicamente pela Figura 1.

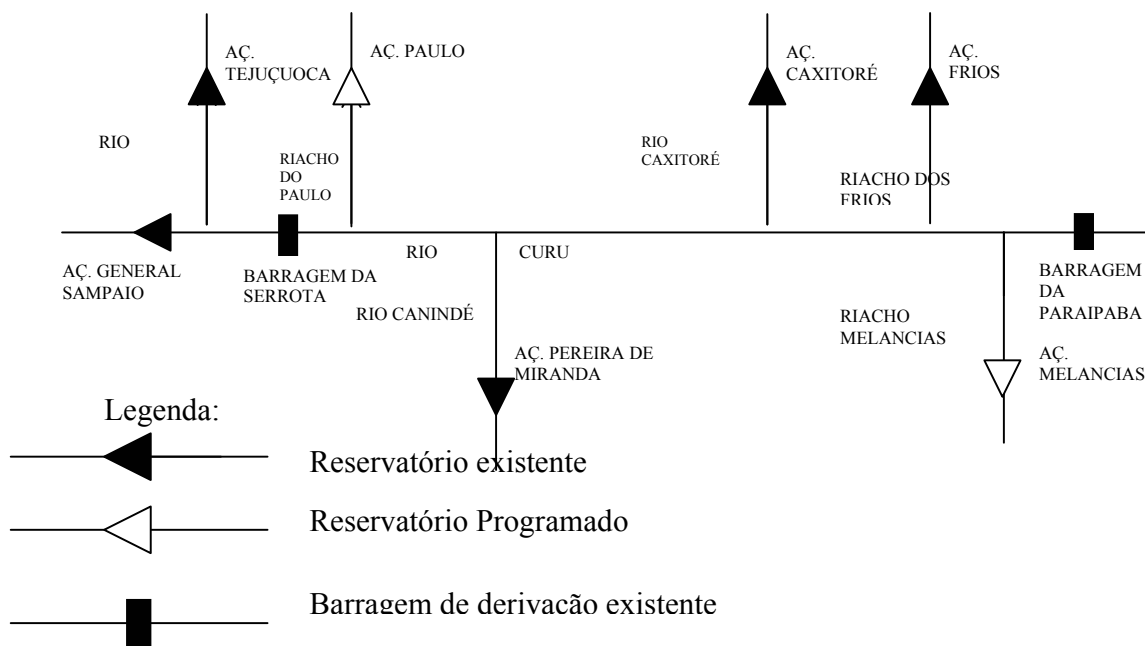


Figura 1: Esquema hidráulico programado para a Bacia do Curu

As duas barragens de derivação existentes, Serrota e Paraipaba, são utilizadas apenas como barragens de elevação de nível. A partir da barragem de derivação de Serrota saem dois canais de irrigação que dominam uma ampla área aluvional do Rio Curu. Esses canais abastecem uma parte do Projeto de Irrigação Público de Curu-Recuperação, a Fazenda Experimental da Universidade Federal do Ceará e um grande número de propriedades rurais.

Do açude Pereira de Miranda parte, também, um canal de irrigação, que alimenta o restante do Projeto Curu-Recuperação. No baixo vale, próximo à barragem de derivação de Paraipaba, encontram-se localizados os principais consumidores. Nesse trecho estão situados o projeto Agro-Industrial da Agrovale, que possui uma extensa área irrigada da cana-de-açúcar, uma usina de açúcar e o Projeto de Irrigação Público de Paraipaba.

Ao longo dos trechos de rios perenizados da bacia existe um grande número de agricultores que derivam água para irrigação de suas propriedades. Ademais, as cidades existentes na bacia são abastecidas com as águas dos grandes reservatórios existentes.

O Comitê da Bacia do Rio Curu, localizado numa importante região agrícola do Ceará, em termos de produção baseada na irrigação, foi criado com base na lei n. 11.996 de 24/07/1992, e aprovado na assembléia de 03/07/97, compondo o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SIGERH, com sede coincidente com a respectiva Secretaria Executiva. O Comitê da Bacia do Rio Curu é composto por 50 membros, escolhidos da seguinte forma: 15 membros representantes dos usuários; 15 membros representantes da sociedade civil; 10 membros representantes das entidades públicas; e 10 membros representantes dos municípios.

As alternativas são as possíveis vazões em  $m^3/s$  que podem ser liberadas provenientes de simulações executadas pela COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará), visando obter valores que permitam a preservação de volumes de reserva dos reservatórios para as finalidades básicas nos próximos períodos de estiagem, e que atinja uma vazão máxima permitida para os fins múltiplos a que se destinam as águas. Nos últimos anos foram liberados as seguintes vazões,  $m^3/s$ , conforme Tabela 1.

Tabela 1 –Vazões Liberadas ( $m^3/s$ ) Fonte: COGERH

Açudes	1997	1998	1999	2000
Pentecoste	3.30	2.00	1.10	1.20
Caxitoré	1.70	2.10	1.60	1.60
Frios	0.05	0.13	0.70	0.80
Gen. Sampaio	2.00	1.40	1.30	0.80
Tejuçuoca	0.10	0.05	0.06	0.16
Total	7.15	5.68	4.76	4.56

#### 4.2 Descrição do Processo Decisório

Dentre vários possíveis critérios envolvidos no processo de decisão escolheram-se alguns critérios que foram considerados fundamentais para decidir que vazão adotar para um determinado período, levando em conta que além do consumo humano e animal, considerados prioritários, a liberação das águas para irrigação na bacia do rio Curu. Este estudo de caso voltou-se para os critérios que contemplam a irrigação, não esquecendo, porém, que a metodologia adotada servirá igualmente para o caso geral, bastando para isto complementar a matriz de decisão com os critérios que irão propiciar este

intuito, como por exemplo: abastecimento humano e animal; índice da qualidade da água; aspectos ambientais: erosão, desmatamento.

Os critérios escolhidos foram os seguintes:

- **Área Irrigada:** Considera-se que a redução da vazão implicará numa redução de áreas irrigadas com determinadas culturas, implicando no prejuízo de alguns irrigantes.

- **Retorno Financeiro:** Este é um dos critérios importantes e uma das conseqüências da variação na vazão liberada.

- **Relação Volume Final do Período/Volume Total:** A incerteza do período chuvoso no Estado do Ceará traz como conseqüência o perigo de desabastecimento em outros períodos, com isto a manutenção de um volume final no período de estudo que propicie uma folga para próximos períodos é fundamental, o que implica que esta relação deve se manter alta, sendo portanto o critério de maior importância.

- **Impacto Social:** Qualquer medida de redução da vazão liberada implica em vários aspectos sociais, pois altera a disponibilidade de água para necessidades pessoais, lazer, economia regional e outros aspectos. Portanto, torna-se fundamental considerar este critério.

- **Impacto Político:** No processo decisório existem interesses conflitantes, isto implica em aspectos políticos, justificando a importância deste critério.

A metodologia utilizada para determinar os três primeiros critérios foi a modelagem de um problema de pesquisa operacional que permitisse otimizar estes aspectos para cada alternativa de vazão a ser liberada. Determinou-se quais as vazões requeridas, em cada perímetro irrigado pertencente ao vale, com as vazões de cada cultura, para o período em estudo a simulação efetuada pelos técnicos da COGERH (Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará) no intuito de preservar a relação Volume Final/Volume Total a maior possível.

São também detalhados os sistemas de otimização para cada alternativa simulada e cujos resultados após o uso do Software LINDO, student version (Winston, 1998), bem como a matriz de decisão (trade-off) que servirá como base para a aplicação dos métodos ELECTRE e método de Programação de Compromisso.

Detalharemos a seguir o consumo de cada cultura nos perímetros irrigados da bacia do rio Curu, com o tipo de irrigação, área de plantio, e vazão requerida, dados extraídos dos relatórios técnicos da COGERH que serviram como base para a elaboração das simulações (Tabela 2).

Os dados a seguir foram os apresentados pelos técnicos da COGERH, em 26/06/2001, ao Comitê da Bacia para o planejamento do período de julho de 2001 a janeiro de 2002. A tabela 3 mostra as vazões que devem ser liberadas em cada açude da região para atingir as vazões totais simuladas.

Tabela 2 – Áreas e vazões dos perímetros irrigados da Bacia do Curu por tipo de irrigação

	FAISA: 290 ha		Curu – Paraipaba 2565 ha		Curu – Recuperação 940 ha		Ypioca 1085 ha	
	Área (ha)	Vazão (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Vazão (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Vazão (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Vazão (m <sup>3</sup> )
<b>Gotejamento</b>								
Melão	240	0,2452	—	—	—	—	—	—
Acerola	50	0,5290	—	—	—	—	—	—
<b>Convencional</b>								
Coco	—	—	1600	0,8641	250	1,1058	—	—
Cana	—	—	300	0,9973	—	—	650	0,9973
Acerola	—	—	40	0,8641	—	—	—	—
Capim	—	—	250	1,0533	—	—	—	—
Caupi	—	—	300	0,6904	300	0,884	—	—
Abóbora	—	—	50	0,8204	—	—	—	—
Graviola	—	—	20	0,2025	—	—	—	—
Goiaba	—	—	5	0,8102	—	—	—	—
Banana	—	—	—	—	340	1,2426	—	—
Perenes	—	—	—	—	50	0,4803	—	—
<b>Inundação</b>	—	—	—	—	—	—	435	1,7657
Perenes	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabela 3 – Detalhamento das vazões simuladas por açude. Fonte: COGERH.

Açudes	Alternativas (m <sup>3</sup> /s)		
Pentecoste	2,000	2,200	2,500
Frios	0,600	0,800	1,000
Caxitoré	0,500	0,700	0,600
General Sampaio	0,600	0,700	0,800
Tejuçuoca	0,060	0,100	0,100
Jerimun	0,025	0,025	0,025
Totais	3,785	4,525	5,025

A tabela 4 mostra a relação entre os volumes simulados.

Tabela 4 - Relação percentual dos volumes finais simulados (hm<sup>3</sup>). Fonte: COGERH.

Nr.	Açudes	Volume Total	Alternativas					
			3,785 (m <sup>3</sup> /s)		4,525 (m <sup>3</sup> /s)		5,025 (m <sup>3</sup> /s)	
			Volume Simulado	%vol.	Volume Simulado	%vol.	Volume Simulado	%vol.
1	Pentecoste	395,64	65,19	16,48	61,62	15,50	56,68	14,32
2	Frios	33,02	8,22	24,88	4,96	15,00	1,21	3,66
3	Caxitoré	202,00	20,68	10,24	20,68	10,24	7,00	3,46
4	G. Sampaio	322,20	18,63	5,78	16,78	5,21	10,53	3,27
5	Tejuçuoca	28,12	3,92	13,94	3,92	13,94	0,98	3,48
6	Jerimum	20,50	0,39	1,87	0,39	1,87	0,39	1,87
	Totais	1001,45	117,03	11,69	108,34	10,82	76,78	7,66

Os modelos de programação linear foram montados da seguinte maneira:

Variáveis: A1 a A15 representando as áreas de irrigação de cada cultura com determinado tipo de irrigação.

Representação dos Códigos

A1 – Coco Convencional; A2 – Cana Convencional; A3 – Banana Sulco; A4 – Caupi Convencional; A5 – Caupi Sulco; A6 – Capim Convencional; A7 – Abóbora Convencional; A8 – Graviola Convencional; A9 – Melão Gotejamento; A10 – Acerola Gotejamento; A11 – Acerola Convencional; A12 – Goiaba Convencional; A13 – Perenes Sulco; A14 – Perenes Inundação e A15 – Coco Sulco.

Função Objetiva: visa a maximizar as áreas irrigadas de cada cultura para a vazão liberada, e é composta pelo somatório dos produtos das possíveis áreas irrigadas e das vazões requeridas.

Restrições

1<sup>a</sup> restrição: somatória das áreas irrigadas menor ou igual à área total dos perímetros.

2<sup>a</sup> restrição: somatória das vazões requeridas menor ou igual à vazão da alternativa.

3<sup>a</sup> restrição: soma das áreas irrigadas de melão menor ou igual à área total disponível para melão.

4<sup>a</sup> restrição: soma das áreas irrigadas com o tipo convencional menor ou igual à área disponível.

5<sup>a</sup> restrição: soma das áreas para cultura de cana convencional e das culturas perenes com inundação menor ou igual à área disponível

Outras restrições: áreas de cada cultura menor ou igual às áreas disponíveis.

As tabelas seguintes mostram os resultados obtidos da resolução dos sistemas acima, resolvidos usando o software LINDO (Winston, 1998).

O cálculo da produção foi determinado a partir da produtividade de cada cultura, usando a tabela de produtividade da EMATERCE (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do

Ceará) e os valores foram calculados usando o preço médio do mercado de Fortaleza, obtidos pela tabela da SEAGRI (Secretaria de Agricultura Irrigada).

Tabela 5 - Resultados para Alternativa I (vazão de 3,785 m<sup>3</sup>/s)

Cultura	Área Beneficiada (ha)	Produção (ton)	Valor (R\$)
Banana	340	4.080	466.285,00
Cana	950	76.000	1.322.400,00
Coco	1948,62	38.972.400	11.691.720,00
Perenes	435	13.050	1.957.500,00
			15.437.905,00

Tabela 6 - Resultados para Alternativa II (vazão de 4,525 m<sup>3</sup>/s)

Cultura	Área Beneficiada (ha)	Produção (ton)	Valor (R\$)
Abóbora	11,6	174	104.400,00
Acerola	40	600	360.000,00
Banana	340	4.080	466.285,00
Cana	950	76.000	1.322.400,00
Capim	250	40.000	12.000,00
Caupi	300	360	756.000,00
Coco	2100	42.000.000	12.600.000,00
Perenes	435	13.050	1.957.500,00
			17.578.585,00

Tabela 7 - Resultados para alternativa III (vazão de 5,025 m<sup>3</sup>/s)

Cultura	Área Beneficiada (ha)	Produção (ton)	Valor (R\$)
Abóbora	50	750	450.000,00
Acerola	90	1.350	5.760.000,00
Banana	340	4.080	468.751,20
Cana	950	76.000	1.322.400,00
Capim	370	444	932.000,00
Capim	250	40.000	12.000,00
Coco	2100	42.000.000	12.600.000,00
Goiaba	5	90	81.000,00
Graviola	0	0	0,00
Melão	240	7.200	5.760.000,00
Perenes	485	14.550	2.182.500,00
			24.619.051,20

A matriz trade-off apresenta os valores necessários à decisão, onde as linhas são as alternativas e as colunas, os valores do critério.

Tabela 8 – Matriz Trade-off

Alternativa (m <sup>3</sup> /s)	Área (Irrigada (ha))	Retorno Financeiro (R\$)	Vol. Final/ Vol. Total	Impacto Social	Impacto Político
3,785	3.673,62	15.437.905,00	11,69	Grande	Grande
4,525	4.426,60	17.578.585,00	10,82	Médio	Médio
5,025	4.880,00	24.619.050,00	7,66	Baixo	Pequeno

#### 4.3 Resolução usando ELECTRE I

O princípio básico do Método ELECTRE é separar do conjunto total das alternativas aqueles que são preferidos na maioria dos critérios de avaliação, e que não causam um nível inaceitável de descontentamentos nos outros critérios.

Os resultados foram obtidos através de uma implementação do método em MATLAB 6.0.

##### A. Critérios usados na avaliação das alternativas

Os critérios serão classificados de acordo com os níveis de importância devidamente classificados e codificados.

Tabela 9 – Classificação de Critérios

Critério	Níveis	Código
1. Área Irrigada	Menos de 3500	30
	de 3550 a 3900	35
	de 3950 a 4300	40
	de 4350 a 4800	45
	de 4850 a 5200	50
2. Retorno Financeiro	Menos de 14000	40
	de 14050 a 15500	45
	de 15550 a 16000	50
	de 16050 a 18000	55
	de 18050 a 20000	60
3. Relação Vol.Final/Vol.Total	de 20050 a 25000	65
	Menos de 8%	30
	de 8,5 a 10,50%	40
4. Impacto Social	de 11 a 15%	50
	Alto	H
	Médio	M
5. Impacto Político	Baixo	L
	Alto	H
	Médio	M
	Baixo	L

## B. Matriz de Avaliação

A matriz de avaliação é composta pelos códigos de classificação das tabelas anteriores.

Tabela 10 – Matriz de Avaliação

Alternativas	3,785 (m <sup>3</sup> /s)	4,525 (m <sup>3</sup> /s)	5,025 (m <sup>3</sup> /s)
Área Irrigada	35	45	50
Retorno Financeiro	45	55	65
Volume Final/ Volume Total	50	40	30
Impacto Social	H	M	L
Impacto Político	H	M	L

## C. Índice de Concordância

A concordância entre duas alternativas representa a disposição do decisor em recolher uma delas em lugar da outra. No cálculo dos índices são determinados pesos que representam o julgamento do decisor.

### C.1 Pesos

No nosso estudo de caso, considera-se que o critério Volume Final/Volume Total tem o maior valor relativo, seguido de impacto social e político. Embora de grande importância, os critérios que representam as áreas irrigadas e o retorno financeiro ficam no nível inferior de peso. A área irrigada teve peso 4; retorno financeiro 3; vol. Final/vol. Total 8; impacto social 5 e impacto político 5.

### C.2. Matriz de Concordância

Os componentes desta matriz podem ser entendidos como uma porcentagem ponderada dos critérios, onde a alternativa *i* é preferida a *j*. Por exemplo, a alternativa 1 é 72% referida à alternativa 2 e a alternativa 2 é 72% preferida à alternativa 3.

Tabela 11 – Matriz de Concordância

	I	II	III
I	0,00	0,72	0,72
II	0,28	0,00	0,72
III	0,28	0,28	0,00

## D. Índice de Discordância

É um índice que representa o desconforto experimentado na escolha de uma alternativa à outra. No item D.1 é determinada uma escala de valores máximos.

### D.1 Valores Máximos das Escalas Numéricas



Os valores máximos da escala numérica foram: área irrigada = 100; retorno financeiro = 80; vol.final/vol. Total = 60; impacto social = 50 e impacto político =50.

### D.2 Valores usados na Determinação dos Índices de Discordância

Nesta tabela são apresentados os códigos que representam o grau de importância de cada nível do critério, de acordo com os códigos da tabela de concordância.

Tabela 12 – Grau de Importância

Critério	Código	Escala Numérica
1. Área Irrigada	30	100
	35	80
	40	60
	45	40
	50	20
2. Retorno Financeiro	40	80
	45	65
	50	50
	55	35
	60	20
	65	15
3. Vol. Final/Vol. Total	30	60
	40	40
	50	20
4. Impacto Social	H	50
	M	35
	L	20
5. Impacto Político	H	50
	M	35
	L	20

### E. Matriz de discordância

Esta matriz representa o nível de rejeição de uma alternativa em relação a outra por um decisor. Por exemplo: A alternativa I tem rejeição de 10% em relação à alternativa II, e a alternativa III tem 10% de rejeição em relação à II.

Tabela 13 - Matriz de Discordância

	I	II	III
I	0,0	0,1	0,2
II	0,1	0,0	0,1
III	0,2	0,1	0,0

## F. Resultados

Para determinar a relação de preferência R, estabeleceu-se valores limites de  $p=0,65$  e  $q=0,35$ , tal que a alternativa  $i$  é preferida em relação à alternativa  $j$ , se:

$$\begin{cases} C(i, j) \geq p \\ D(i, j) \leq q \end{cases}$$

Onde,  $C(i,j)$ : elemento da matriz de concordância.

$D(i,j)$ : elemento da matriz de discordância.

## Vetor de Preferência

Representa a ordem de preferência das alternativas:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  (Vetor de preferência)

## G. Conclusão:

A alternativa 1 foi a preferida em virtude do alto peso dado à relação Volume Final/Volume Total, visando a conservar um volume final do reservatório que trouxesse tranquilidade de abastecimento nos anos seguintes. Observa-se que os outros critérios não tiveram muita influência na resolução do problema.

### 4.4 Resolução por Programação de Compromisso

A programação de compromisso baseia-se em uma noção geométrica do melhor. No método, são identificadas as soluções que estão mais perto da solução ideal, mediante o uso de uma medida de proximidade.

#### A. Matriz de Avaliação

Foram considerados os mesmos critérios do ELECTRE, e com consideração de pesos semelhantes. No caso dos critérios subjetivos foram atribuídos valores aos mesmos.

Tabela 14 - Matriz de Avaliação

Critérios	Unidade Medida	Alternativas			Máx	Mín	Peso
		I	II	III	M	P	$\alpha$
Área Irrigada	ha	3673,62	4426,60	4880,00	4880,00	3673,62	4
Retorno Financeiro	$10^6$ R\$	15,44	17,58	24,62	24,62	15,44	3
Vol. Final/ Vol. Total	%	11,69	10,82	7,66	11,69	7,33	8
Impacto Social	Subjetiva	5	3	1	5	1	5
Impacto Político	Subjetiva	5	3	1	5	1	5

#### B. Distância $L_s$

A solução ideal será formada pelo vetor dos melhores valores alcançados em cada critério na matriz de avaliação. A Tabela 15 representa os valores obtidos de acordo com o valor de  $s$ , que reflete a importância que o decisor atribui aos desvios máximos.

Tabela 15 – Distâncias  $L_s$

Alternativas	S=1	S=2	S=?
I	1,0068	0,9329*	0,4483*
II	1,1757	1,1278	0,5000*
III	1,2611	1,2453	1,2200

Os valores marcados com asterisco na Tabela 15 indicam as distâncias mínimas entre a solução de compromisso e a ideal, indicando que a melhor alternativa é a I, seguida das alternativas II e III.

**C. Conclusão:** O resultado deste método comprova os resultados do método Electre, de acordo com as concepções e julgamentos adotados.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Desenvolveu-se um procedimento, o qual permite aos participantes do Comitê da Bacia do rio Curu decidir qual a melhor vazão a ser liberada, em determinado período, levando em conta diversos fatores que compõem o problema, tanto fatores quantitativos (como área irrigada ou retorno financeiro), quanto subjetivos (como aspectos sociais e políticos).

Aplicou-se a programação linear para encontrar quais áreas de culturas podem ser irrigadas, com determinado tipo de irrigação, usando as vazões simuladas de forma a otimizar o retorno financeiro do investimento executado.

A metodologia proposta envolveu não somente a programação linear, como também métodos multicritérios (o método ELECTRE e o método de Programação de Compromisso) que ajudaram a decidir qual a melhor vazão para os critérios escolhidos. Os métodos ELECTRE I e Programação de Compromisso possibilitam, através da análise multiobjetivo, a consideração simultânea dos aspectos sociais, ambientais e econômicos no complexo contexto decisório dos comitês gestores de bacia hidrográfica.

Além dos dados quantitativos, mensuráveis e avaliados através de variáveis contínuas, os métodos utilizados possibilitam a consideração da subjetividade, permitindo a introdução dos aspectos qualitativos do processo decisório, através de variáveis discretas, por meio de escalas adequadas de avaliação. Por meio das classificações obtidas, empregando-se os dois métodos utilizados e de forma

consistente, consideramos as alternativas de maior atratividade e descartadas as de menor atratividade, para cada situação.

As considerações que seguem, resultaram do estudo e aplicação dos dois métodos apresentados para a solução do caso formulado.

a) O método ELECTRE é baseado no conceito de dominância entre as alternativas de solução, a partir de relações de preferências estabelecidas. Os resultados obtidos sofreram grande influência dos pesos aplicados aos critérios. A solução obtida convergiu para a alternativa I, quando aplicou-se um alto peso para a relação Volume Final/Volume Total.

b) O método da Programação de Compromisso é ágil, de fácil visualização gráfica e propicia a interação entre avaliadores e decisores ao longo do processo decisório. Também sofreu uma grande influência dos pesos adotados.

As técnicas de análise multiobjetivo foram aplicadas a matrizes de avaliação previamente estabelecidas. Na realidade, as matrizes de avaliação representam um dos resultados do importante processo de estruturação do problema, que deve anteceder à aplicação das técnicas de análise multiobjetivo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENAYOUN, R e TERGNY, J. Critères multiples en programmation matemática: une solution dans le cas linéaire. **RIRO**, v. 2, 31-56, 1969

GUIOUNI, A., MARTEL, J.M., 1998. **Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method**. European Journal of Operational Research. 109, 501-521.

KEENEY, R. L. **Building models of values**. European Journal of Operational Research, North-Holland, v. 37, pp. 149-157, 1988.

ROY, B. **Partial preference analysis and decision-aid: the fuzzy outranking relation concept**, in: ROY, B., VANDERPOOTEN, D., 1997. **An overview on “The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works”**. European Journal of Operational Research. 99, 26-27.

WINSTON, Wayne L. **Operations research: application and algorithms** / 3<sup>rd</sup> ed. Duxbury Press, 1998.

ZELENY, M., **Compromise programming**, en *MCDM* (Cochrane-zeleny eds.) USC: 373-391, 1973.