

## Análise Dinâmica de Riscos, Uma Hiper-heurística Híbrida para Apoio à Decisão na Operação de Reservatórios

Adbeel Goes Filho\*

adbeel.goes@gmail.com, adbeel@unifor.br

Recebido: 14/06/11 - revisado: 18/04/12 - aceito: 10/05/13

---

### RESUMO

*Atualmente, a gestão de reservatórios de acumulação hídrica constitui um tema complexo e polêmico, envolvendo procedimentos operacionais ainda não equacionados, à conta de fatores diversos no ambiente holístico, dentre os quais as divergências políticas, a falta de comunicação entre os gestores, e os efeitos das mudanças climáticas. Ao ser considerada tal assertiva, descrevemos um modelo computacional, dentro de uma abordagem hiper-heurística híbrida, com análise multicritério e metodologia própria de análise dinâmica de riscos, consistindo esse desenho da integração de modelos hidrológicos, de simulação, de apoio à decisão e análise de riscos, em um cenário real e atual, onde, com a consideração multicritérios de análise e alternativas apropriadas de benefícios, é formalizada uma decisão factível e imparcial. Os resultados obtidos, deste estudo, mostram claramente, as falhas encontradas, na operação do reservatório Castanhão, no Estado do Ceará, de domínio público e alvo principal da nossa atenção. Deduz-se, desse modo, a necessidade da gestão participativa, bem como a utilização de ferramentas tecnológicas da informática e da telecomunicação, que possibilitem essa integração, em tempo real, para eventos críticos, como no caso das cheias, sem desprezar, no entanto, os estudos históricos não normatizados de operações passadas.*

**Palavras-chave:** Análise de riscos. Heurísticas. Apoio à decisão.

---

### INTRODUÇÃO

A água, em abundância ou escassez, gera conflitos e opiniões divergentes quanto à sua utilização, por conta da sua natureza limitada e dada à sua vocação para fomentar relações e ações humanas. Distribuída irregularmente, no tempo e no espaço, por força das condições geográficas, climáticas e meteorológicas, assume capital importância para os seres vivos. Apesar de considerada um bem natural renovável, há necessidade de que seja preservada e bem gerenciada, pelo entendimento de que é um recurso finito e de ocorrência aleatória.

Decidir sobre a gestão das águas, consiste na escolha da melhor alternativa, de acordo com critérios prévios, a partir de determinada quantidade de informações e com foco em um objetivo. As visões diversas dos tomadores de decisão, provocam discordâncias, dada à complexidade dos cenários, que transcende à modelagem matemática e exige, cada vez mais, o

armazenamento persistente das experiências e conhecimentos, no tempo e no espaço, consolidados com as ferramentas céleres da computação digital.

O planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, para resultados favoráveis, devem integrar diversas tecnologias, colaborativamente, capazes de promover a superação de obstáculos e o atendimento racional à demanda por reservas hídricas. Diante das incertezas que se anunciam, técnica e bom senso precisam estar juntos, ligando o real ao imaginário, na luta para a melhoria das condições humanas, em antecipação às necessidades futuras.

Os reservatórios, utilizados para regularização temporal e espacial da água, suprem as necessidades, para atender à demanda, em períodos de escassez, quando devem ser realizadas contenções em períodos de deflúvios intensos. Torna-se imperativo que os elementos que os alimentam (rios, precipitações, dentre outros) e os que ocasionam perdas de seu volume (evaporação, infiltrações etc) sejam monitorados, dinamicamente. Para a efetiva gestão, as informações disponíveis devem ser organizadas, proporcionando rapidez e integração.

---

\*Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – Fortaleza - CE

Objetiva-se, com este estudo, a aplicação de um modelo híbrido de tomada de decisão, focado em três eixos: conhecimento, integração e colaboração, com visões no passado, presente e futuro, e considerando os ambientes de certeza, risco e incerteza (Figura 1). No eixo do conhecimento, os dados podem ser inseridos estática e dinamicamente, baseados em séries históricas e comunicação telemétrica, bem como na experiência e legislação vigente. No eixo de integração são acoplados modelos de balanço hídrico, simulação, análise de risco, computacionais e sistemas de decisão. Já no eixo de colaboração, há que se considerar as conferências de decisão com os vários atores do cenário em análise, de forma a identificar, avaliar e decidir a operação de um reservatório, em escalas temporais apropriadas e em ambiente de decisão específico.



Figura 1 - Abordagem global

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme Porto e Azevedo (2002), a tomada de decisões a respeito de sistemas de recursos hídricos deve considerar os aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, mutáveis no tempo e associados a incertezas, de difícil quantificação. À medida que as demandas de água crescem, acirram-se os conflitos e disputas, e os sistemas de recursos hídricos tendem a se tornar maiores e mais complexos. Assim, a construção e gerenciamento destes sistemas estão associados, geralmente, a investimentos de grande porte, longos prazos e políticas cuidadosas de operação e manutenção. Tais características impõem a necessidade de planejamentos estratégicos que conciliem eficiência econômica, sustentabilidade,

flexibilidade e equidade.

A necessidade de representação de fenômenos naturais complexos, através dos diversos modelos existentes, é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. É através deles que se procura o entendimento dos processos naturais e se analisa a resposta do sistema para cenários diferentes, dando vez à coleta de elementos para as tomadas de decisões.

Segundo Braga (1987), modelos de simulação são formados por expressões matemáticas em sequência lógica, descrevendo o sistema no espaço e no tempo, representando e operando de forma a mais detalhada possível, fornecendo informações e avaliando o comportamento do sistema real. Na operação de reservatórios, a simulação realiza, em um intervalo de tempo, o balanço de massa nos locais de interesse, considerando as características físicas no sistema e as regras de operação. Sua principal vantagem é a aplicação em sistemas complexos, aceitando formulações diversas de restrição, mesmo sem determinar uma política ótima de operação, objetivo este dos modelos otimizantes. A solução é encontrada iterativamente e comparando seus desempenhos. No contexto de Allen et al. (1991), o problema de operação de reservatórios pode ser exposto com a questão: “que volume de água deve ser armazenado em determinado reservatório, para prover determinada demanda, a um nível aceitável de confiança, e que vazão regularizar, em obediência aos limites físicos e políticos existentes?”.

Quando o problema é formulado em um longo intervalo de tempo (uma semana ou mais), é chamado de planejamento de operações, a longo prazo; caso seja formulado dentro de um curto espaço de tempo (um dia ou menos), dá-se ao problema o nome de operação de reservatórios, em tempo real. Na aplicação à operação de reservatórios, ainda segundo Allen et al. (1991), o interesse é saber qual liberação de fluxo efluente do mesmo é aceitável, a título de minimização dos riscos com escassez de água e inundações, e aproveitando, ao máximo, o benefício dessa água, baseado em princípios de gerenciamento e desenvolvimento sustentável.

No tocante à metodologia multicritério, observa-se que ela consiste em tomar decisões baseadas em informações teóricas concisas, considerando os diversos fatores atuantes. É uma técnica de pesquisa operacional que lida com problemas de otimização de processos. Ao contrário do que ocorre com os problemas de otimização clássica, em que se busca o ótimo, os problemas de

Apoio à Decisão Multicritério (ADM) evitam uma solução pré-formatada, fugindo, assim, do “paradigma do ótimo” (CLÍMACO, 2004), lidando com ótimos de Pareto, onde se procura o ótimo possível, em contraponto ao ótimo absoluto da programação matemática. Uma alternativa é um ótimo de Pareto, se for impossível passar desta alternativa para outra, melhorando um critério, sem piorar, pelo menos, um outro critério. Percebe-se então, que o ótimo de Pareto é uma alternativa não dominada. Trata-se, no caso, de uma técnica quantitativa para tomada de decisão, que permite a objetivação dos juízos de valor ou subjetividade inerente ao processo decisório em que interagem vários agentes e cuja decisão deve ser baseada em múltiplos critérios. Ademais, alguns paradigmas devem ser superados, priorizando-se a decisão imparcial e objetiva, bem como a escolha de uma alternativa viável.

Segundo Olson (2001), os estudos que comparam as diversas modalidades de ADM demonstram que não existe nenhuma metodologia que se destaque de outras, em todos os contextos de decisão que envolvem múltiplos critérios. Assim, um analista de decisão deve possuir conhecimentos suficientes para estabelecer a metodologia a ser empregada no ambiente de estudo, em função da decisão a ser tomada.

O processo para a escolha de um algoritmo multicritério depende de muitos fatores, tais quais as características do problema, o contexto e a estrutura de preferência do decisor (BELTON; STEWART, 2002).

Neste estudo, alguns métodos foram utilizados para comparação, sem a preocupação com a escolha de um melhor possível. Contudo, fez-se oportuno atentar para a redução da complexidade do cenário avaliado, e a consequente implementação dos métodos simples e objetivos, com características de simplificações matemática e eficiência computacional, para prover as necessidades.

Em sistemas de recursos hídricos há a aleatoriedade dos processos hidrológicos, fonte de incertezas na análise da disponibilidade da água, as quais são tratadas por abordagens estocásticas. Essa incerteza é fato gerador de complicações em processos de tomada de decisão. Já na abordagem implicitamente estocástica, os problemas são resolvidos, considerando o conhecimento total ou parcial desses eventos, base para a fundamentação da análise de riscos. Tais eventos são analisados através de observações detalhadas nas séries históricas de dados e, diante da não disponibilidade

destes dados, são usadas séries sintéticas, geradas através de modelos estocásticos de simulação.

A maioria das decisões, complexas ou não, é tomada com lastro em algum tipo de previsão, a qual, por sua própria natureza, já insere o fator incerteza no modelo, bem como a própria insuficiência de informações (ANDRADE, 2000). Assim, como mecanismo de análise do grau de incerteza existente no processo, procura-se fazer uma estimativa do risco envolvido.

Mesmo com significados distintos, as palavras “risco” e “incerteza” podem muitas vezes estabelecer uma relação sinônima. Conforme Vieira (2005), “são as incertezas que nos cercam, a fonte geradora dos riscos que nos ameaçam”. As incertezas não são quantificáveis, quando geradas por fenômenos naturais (aleatórios) ou epistêmicos (falta de conhecimento). Por sua vez, geram imprecisão, ou seja, dificuldade de distinguir as coisas em seus limites, além de ambiguidades, com respeito aos relacionamentos múltiplos com alternativas não especificadas. Entra nesse contexto, todo tipo de erro envolvido na relação do homem com a natureza, na determinação e processamento de informação de variáveis randômicas.

Enquanto isso, os riscos, são quantificáveis, quer impostos pela natureza ou tendo o homem como principal agente gerador. Define-se então, o termo “risco”, como a probabilidade de excedência ou não da distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias. Ainda de acordo com Andrade (2000), risco é definido como uma estimativa do grau de incerteza que se tem, inerente à realização de resultados futuros desejados.

Segundo Vieira (2005), a análise de risco pode ser definida como “um corpo de conhecimento (metodologia) que avalia e determina a probabilidade de um efeito adverso de um agente (químico, físico, ou outro), processo industrial, tecnologia ou processo natural”. Considerando-se a probabilidade como medida de incerteza, mesmo que o problema seja novo, para um decisor, há sempre informações sobre o problema, aptas a determinar a sensibilidade sobre os componentes envolvidos.

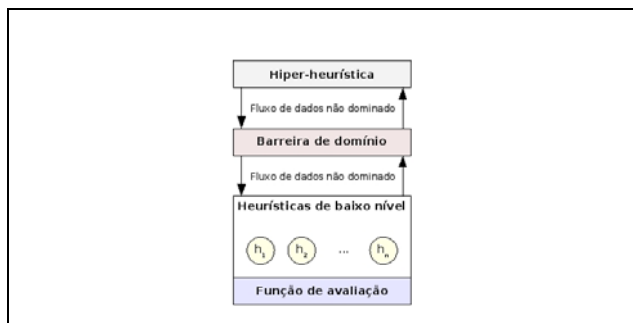
Decisão é uma ação escolhida como um meio efetivo e eficiente de obter um resultado esperado na realização de um objetivo, para os quais os meios e os recursos foram alocados (ANDRADE, 2000). Como um instrumento de gestão, envolvendo a tomada de decisão, a análise de riscos compreende, de uma forma geral, quatro etapas: a identificação ou qualificação dos riscos; a quantificação dos riscos; a minimização dos riscos; e

a mitigação ou remediação dos efeitos dos riscos.

Levando-se em conta o mundo real, a obtenção de probabilidades nem sempre é possível, devido à quantidade de fatores envolvidos e questionamentos discordantes da subjetividade. O decisor poderá ter problemas quanto à escolha de uma alternativa, que poderá resultar em sucesso, caso ocorra um evento favorável, ou em fracasso, se o evento ocorrido for desfavorável.

Do ponto de vista da heurística, ou seja, a capacidade de um sistema inovar e desenvolver técnicas imediatas, métodos exploratórios são utilizados para resolver problemas, através de aproximações sucessivas e avaliando os resultados, até que a solução seja encontrada. Na verdade, com aplicações algorítmicas, os resultados são avaliados, empiricamente. O que se observa é que as técnicas heurísticas não asseguram as melhores soluções, não obstante serem consideradas aproximadas e válidas. Via de regra, a validade dos resultados não é justificável por termos estritamente lógicos, caso como o deste estudo, em que são consideradas as variáveis aleatórias de precipitação, vazão e outras, de natureza puramente estocástica. Mesmo assim, há de se considerar as estratégias heurísticas, para a definição dos problemas: busca às cegas, baseada na experiência (heurística) e racionalidade, com uso do raciocínio no foco sistêmico.

No caso do modelo híbrido proposto, via integração de técnicas de modelagens diversas, com avaliação em tempo real, amplia-se o conceito de heurística para hiper-heurística (Figura 2), ou seja, algoritmos que operam com uma grande generalidade. A compreensão que a análise permite, é a de um conjunto de métodos que podem ser aplicáveis a um extenso conjunto de problemas. Não entra no mérito a exigência de alterações substanciais, resolvendo-se o conflito entre a implementação e a qualidade, sem a mínima pretensão de querer superar outras técnicas.



**Figura 2 - Heurística.**  
**Fonte: Burke et al. (2003)**

## METODOLOGIA

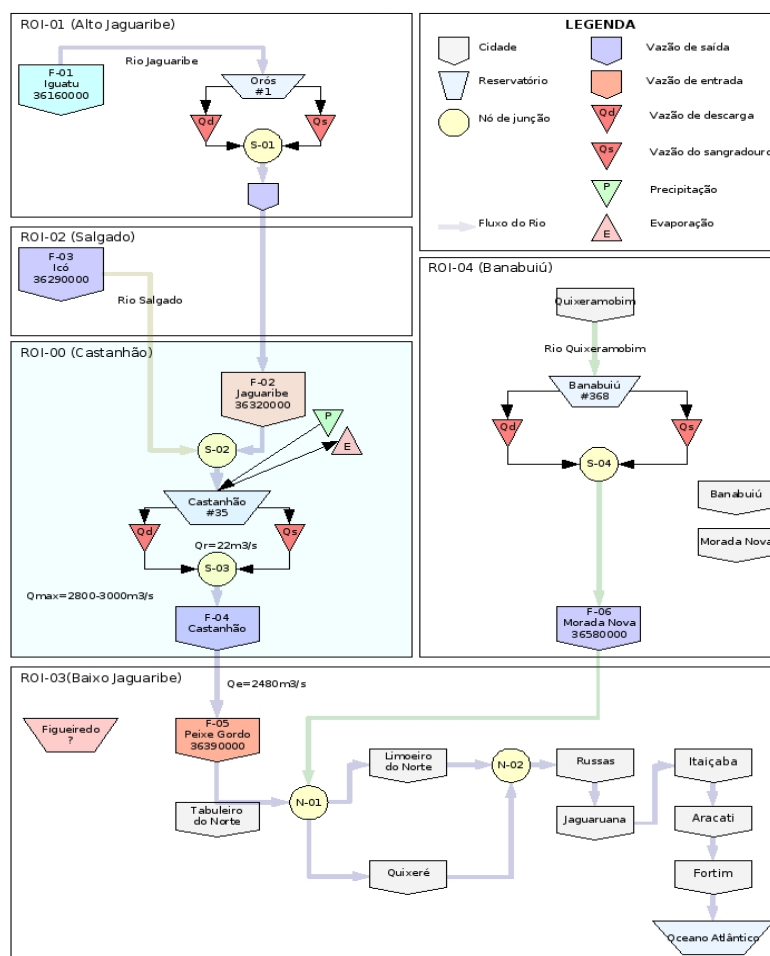
O modelo adotado, neste trabalho, é o hipotético-dedutivo, heurístico, que consiste em apresentar um problema e lançar hipóteses para explicá-lo, via execução de operações que busquem tornar falsas essas hipóteses. Caso o resultado refute alguma delas, ocorre sua eliminação; do contrário, é aceita. Conforme Lakatos e Marconi (1991), na prática, a incerteza sobre sua verdade ou falsidade, sempre existe.

É desse modo que se formula, desenvolve-se e aplica-se um modelo para resolução de problemas, envolvendo operação de reservatórios, baseado em métodos de simulação, contemplando funções caracterizadas por critérios da receita líquida advinda do balanço hídrico de um reservatório e de regiões de influência, com finalidade de prover a melhor representação e compreensão do comportamento desse sistema físico, quando submetido a um determinado conjunto de condições variáveis no tempo.

Conforme Campos (2006), não se pode limitar os estudos a uma simples aplicação da série histórica de vazões; há, pois, que se fazer a modelagem matemática, estabelecida com base no balanço hídrico e condições definidas pelas características hidráulicas dos reservatórios, condições hidrológicas, ambientais, políticas e socioeconômicas, que serão identificadas para a operacionalidade do sistema. Exige-se, assim, o conhecimento dos principais componentes de um sistema hídrico, como: vazões afluentes, demandas, vazões de restrição à jusante do ponto de interesse, limites operacionais dos níveis dos reservatórios, volumes precipitados e evaporados nas bacias hidráulicas, volumes armazenados nos reservatórios, volumes mínimos e máximos permitidos nos reservatórios. A modelagem visa, então, o estudo de cenários futuros, com as devidas restrições técnicas e operacionais.

A estratégia metodológica traçada, neste estudo, considerou os seguintes passos:

- Elaboração de cenários: estudar, entender, analisar e descrever o comportamento do problema, montando alternativas possíveis, em função dos objetivos fixados;
- Simulação de cenários;
- Avaliação do desempenho do sistema: avaliar, quanto à eficiência dos resultados, utilizando indicadores e estruturas de decisão; e,



**Figura 3 - Diagrama esquemático das áreas de interesse (ROI)**

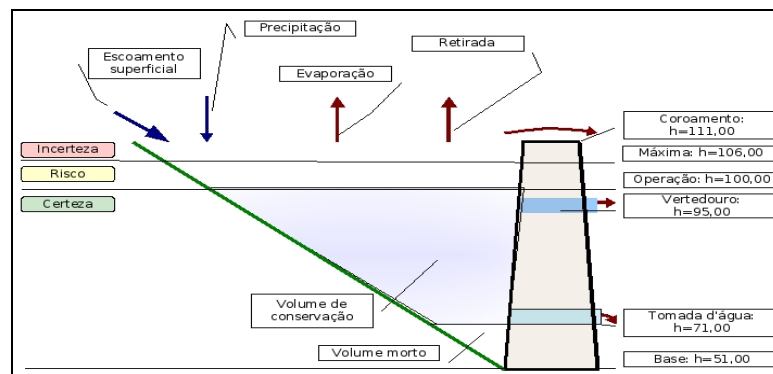
- Selecionar o melhor cenário: avaliar, comparar, classificar e selecionar cenários.

O cenário em estudo, para aplicação da metodologia, foi o sistema do reservatório Castanhão (Figura 3), situado na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, estado do Ceará, na região nordeste do Brasil. Concluído em 2003, pelo DNOCS (2009), observa-se que, até o presente momento, pela análise dos dados de monitoramento hidrológico, não existem regras objetivas para sua operação. Dada à sua complexidade e em função da área geográfica, em que se insere, há a necessidade de definições, capazes de prover tomadas de decisão efetivas, para sua operação. A metodologia eleita emprega as seguintes etapas:

- Reconhecimento do Sistema Hídrico e

- levantamento dos diversos tipos de usos;
- Diagnóstico Institucional / Organizacional, com caracterização de responsabilidades;
- Planejamento e simulação da operação do sistema;
- Balanço Hídrico (demanda x oferta);
- Articulação e mobilização dos técnicos e agentes decisores;
- Formação de conferências de grupo com os envolvidos no processo de decisão; e,
- Monitoramento contínuo do sistema.

Levando em conta o cenário, em estudo, diagramado de acordo com a Figura 3, quanto ao modo de operação, especificamente, foram estabelecidos os seguintes ambientes de análise, visualizados na Figura 4 e na Tabela 1:



**Figura 4** - Perfil do reservatório Castanhão

**Tabela 1** - Zonas de decisão

Ambiente	Zona	Zona (Cota h)	Escala	Observações
Certeza	Volume morto e conservação	$0 < h < 100$	Mês, ano	Segurança máxima
Risco	Controle de cheias	$100 \leq h \leq 106$	Dia, hora	Segurança relativa
Incerteza	Volume não controlado	$106 < h < 111$	Hora	Segurança mínima

- Ambiente de certeza: corresponde à cota menor que 100,00m, definido como a operação do volume morto e volume de conservação, com análise temporal mensal e sob influência de critérios políticos, sociais, econômicos e ambientais. Objetiva manter o máximo do volume existente;
- Ambiente de risco: corresponde à variação da cota de 100,00m a 106,00m e análise temporal, em escala diária ou horária, objetivando o controle de cheias, com prevalência de critérios técnicos, em detrimento dos demais. Necessita reter o mínimo do volume; e,
- Ambiente de incerteza: corresponde à cota acima de 106,00m e cujo volume caracteriza-se pela falta de controle. É uma zona de alerta, onde todo o conhecimento multidisciplinar deve ser analisado. Necessita avaliação contínua e em tempo real.

Na determinação do comportamento do reservatório utiliza-se, preferencialmente, a metodologia do balanço hídrico, que consiste em

igualar as entradas e saídas no sistema, conforme Eq. 1:

$$dV / dt = E - S \quad (1)$$

Onde:  $dV/dt$  é a variação do volume ao longo do tempo; E, o resultado de todas as entradas no sistema; e S, o resultado de todas as saídas do sistema.

São consideradas entradas, os deflúvios afluentes e as precipitações sobre o espelho d'água do lago. Já as saídas são representadas pelas retiradas diversas (abastecimento, irrigação, regularização do rio etc) e evaporações. Assim, de acordo com Campos (2006), a equação do balanço hídrico pode ser expressa por:

$$V_{t+1} = V_t + (P_t - E_t) (A_{t+1} + A_t) / 2 + I_t - R_t - L_t \quad (2)$$

Onde: V é o volume, P a precipitação, E a evaporação, A a área, I a vazão de entrada, R a vazão de retirada e L a vazão liberada em um tempo t.

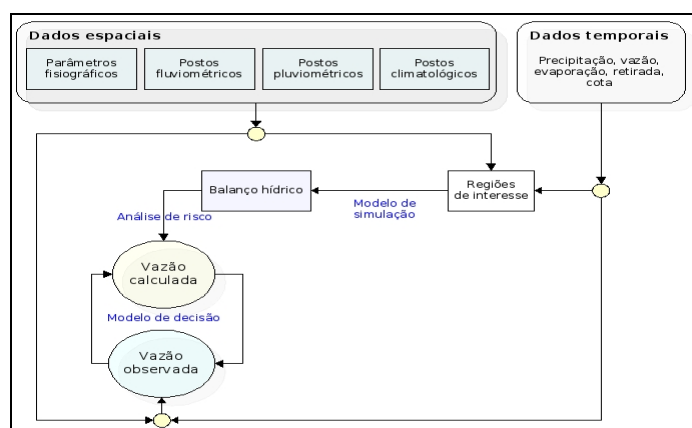


Figura 5 - Integração de modelos

Tabela 2 - Regiões de interesse (ROI) do cenário avaliado

ROI	Natureza	Descrição da bacia	Nó de influência
0	Master	Médio Jaguaribe	Açude Castanhão
1	Slave	Alto Jaguaribe	Rio Jaguaribe, em Jaguaribe
2	Slave	Salgado	Rio Salgado, em Icó
3	Slave	Baixo Jaguaribe	Rio Jaguaribe, em Peixe Gordo
4	Slave	Banabuiú	Rio Banabuiú, em Morada Nova

A modelagem integrada, descrita na Figura 5, estabelece os relacionamentos entre diversos componentes do sistema, para uma dada região de interesse. A par disso, serve de base para compor o fluxo de informação no cálculo do balanço hídrico, considerado em vários critérios de análise, bem assim suprir o modelo de decisão, para estabelecimento de alternativa sugerida para a operação do reservatório, no caso da liberação de vazão. Objetiva, também, manter a segurança da barragem e minimizar os efeitos de inundação na região da bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe.

Enquanto isso, a modelagem decisória corresponde à integração dos elementos participantes do cenário. Em resumo, consiste na definição de critérios e alternativas de decisão, considerando os aspectos envolvidos, estabelecendo, assim, uma estrutura aqui chamada de Plano de Decisão (PD), na verdade uma matriz de pesos de decisão, formada por colunas de critérios e linhas de alternativas possíveis.

Para a formatação de um PD é escolhida

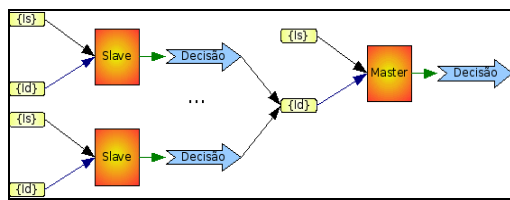
uma estrutura de decisão convencional, levando em conta, também, a variação dos pesos dos critérios no espaço (*Regions of Interest* – ROI) e no tempo. As ROI (Tabela 2) podem ser consideradas como mestres (*master*) e escravas (*slave*). A ROI *master* é a responsável pela decisão final requerida; já as ROI *slave* são responsáveis por decisões complementares (Figura 6), que ficam à mercê da vontade do decisor, que pode desabilitá-las ou não, para análise, como critério à ROI *master*.

Cada critério pode, por sua vez, apresentar uma natureza estática ou dinâmica. Se de natureza estática, os pesos são fixados através de alterações propostas, local ou remotamente, pelas conferências de decisão, em um ambiente de colaboração geograficamente distribuído.

Caso a natureza seja dinâmica, o peso de cada critério é formalizado como uma função específica, tomando como parâmetro, além do ajuste temporal, dada sua natureza, uma variável de referência (benefício), associada a cada alternativa. Para as conferências, há necessidade da utilização de



conjuntos difusos (*fuzzy sets*), conforme o critério utilizado, para análise e codificação semântica dos pesos de cada alternativa.



**Figura 6 - Rede de ROI**

O Plano de Decisão (PD) resume o cenário avaliado, descrevendo as regiões de interesse no sistema. Com os aspectos e especificidades caracterizados na formação de cada critério, são definidos, no processo de modelagem, os elementos participantes da sua formação. Cada critério possui características próprias de configuração e, obviamente, quanto mais bem descrito for, melhor reflete a realidade do modelo. Em se tratando das alternativas, segundo a experiência do responsável pela modelagem, essas sugerem a realidade, quanto aos valores esperados de liberação de vazão pelo reservatório operado.

Após o processamento dos dados para uma data, em uma escala de tempo, o PD é preenchido com os pesos inerentes a cada critério, para cada alternativa, em uma apresentação temporal aqui denominada análise dinâmica de riscos, a qual se vale de processos de análise de riscos, em tempo real, e com variáveis obtidas, também, em tempo real.

O peso de cada critério é então calculado, segundo sua natureza e modelagem matemática, considerando aqueles de natureza dinâmica, como uma função do tempo e da variável de referência de uma alternativa, observadas as variáveis componentes de seus nós, no caso, agregadores de variáveis específicas, em pontos de interesse. Os critérios ditos colaborativos não são calculados, mas seus pesos são definidos em escala semântica de avaliação própria, através das conferências de decisão.

Já os pesos dos critérios de conferência são estabelecidos, estaticamente, segundo a experiência do agente participante. Estes podem, contudo, sofrer uma mutação para a natureza dinâmica, caso haja a necessidade de avaliação de impactos de uma forma mais detalhada em relação às alternativas. Neste caso, há a necessidade de um pré-processamento. A opção recai na natureza estática,

quando se quer diminuir a complexidade dos cálculos.

Após o preenchimento e validação dos critérios e alternativas do PD, realiza-se o processamento, segundo configurações escolhidas. Com a obtenção do resultado, e a decisão sobre as alternativas propostas, procede-se, então, a uma análise de contexto, observando-se a necessidade ou não de calibração do modelo.

Tomando-se como referência a equação do balanço hídrico (Eq. 1), foram realizadas as seguintes formulações, considerando um tempo corrente  $t$ , e um tempo anterior  $t-1$ , e um tempo posterior  $t+1$ , em escala de tempo previamente configurada. No caso do processamento em ambiente de risco, optou-se pela escala temporal diária para avaliação. Uma escala horária também é apropriada, no caso de recepção de dados telemétricos, em tempo real. Assim:

$$V_t = V_{t-1} + (P_{t-1} - E_{t-1}) (A_t + A_{t-1}) / 2 + I_{t-1} - R_{t-1} - L_{t-1} \quad (3)$$

Onde:  $V$  é o volume,  $P$  a precipitação,  $E$  a evaporação,  $A$  a área,  $I$  a vazão de entrada,  $R$  a vazão de retirada e  $L$  a vazão liberada.

Em um tempo  $t$ , obtêm-se o valor da cota ( $h$ ). O volume e a área são calculados, em função da relação cota x área x volume (CAV):

$$V(h_t) = V(h_{t-1}) + (P_{t-1} - E_{t-1}) A(h_{t-1}) + I_{t-1} - R_{t-1} - L_{t-1} \quad (4)$$

Considerando as variações com o tempo:

$$C = -\partial V(h_t) / \partial t + (P(t_s) - E(t_s)) \partial A(h_t) / \partial t + I(t_s) - R(t_s) - L(t_s) \quad (5)$$

A Função Desempenho ( $Z$ ), considerada para a análise de riscos, será, então:

$$Z = B - C < 0 \quad (6)$$

e

$$P'(Z < 0) = P'(B < C) \quad (7)$$

$$Z = B - [-\partial V(h_t) / \partial t + (P(t_s) - E(t_s)) \partial A(h_t) / \partial t + I(t_s) - R(t_s) - L(t_s)] \quad (8)$$



Onde: B é o valor da variável de referência (benefício), na alternativa em análise; C o custo;  $t_s$  o tempo para as séries;  $t$  o tempo presente;  $P'$ , a probabilidade; V o volume; P a precipitação; E a evaporação; A a área; I a vazão de entrada; R a vazão de retirada e L a vazão liberada.

No processo de análise dinâmica de risco, é fundamental a utilização de métodos de simulação, considerando as propriedades estatísticas das variáveis aleatórias envolvidas em cada ponto de análise (nós).

O Método de Monte Carlo foi escolhido, por ser um processo de operar modelos estatísticos, de forma a lidar, experimentalmente, com variáveis descritas por funções probabilísticas (ANDRADE, 2000). Consiste o mesmo na geração de números aleatórios, entre 0 e 1, para as variáveis consideradas aleatórias e independentes. Através dos cálculos, são obtidos valores correspondentes na função de distribuição pertinente. Ao que se observa, para verificar o comportamento de um modelo, basta que se tenha uma série histórica, e dela sejam extraídas suas propriedades estatísticas.

Procedendo-se dessa forma, os valores são atribuídos na função desempenho Z (Eq. 6) e realizadas simulações. O risco é então avaliado pela razão entre a quantidade de valores Z negativos (Falhas), pela quantidade de eventos de Z, gerados por simulação.

O processamento integrado consiste em calcular o resultado de uma forma global, conforme as regras configuradas. Considera-se três fases: planejamento, execução e análise.

A fase de planejamento é orientada pelas seguintes etapas:

1. Estabelecimento do cenário;
2. Seleção das regiões de interesse (ROI). Definição da ROI principal (*Master*) e das ROI secundárias (*Slaves*);
3. Definição dos aspectos envolvidos;
4. Definição e configuração dos critérios de avaliação, segundo suas propriedades e prioridades;
5. Agrupamento dos critérios, em relação aos aspectos considerados;
6. Definição das alternativas, em ordem crescente de receita líquida (benefício);
7. Definição, para cada ROI, das variáveis de interesse e suas entradas e saídas no sistema;
8. Verificação dos dados necessários ao cálculo das variáveis utilizadas; e,
9. Modelagem do Plano de Decisão.

A fase de execução consiste em processar o modelo, integralmente (Figura 7), calculando cada critério, individualmente, e, após o término, processar o PD. Considera-se, na execução, a escolha de uma data de referência para o horizonte de tempo pretendido (Escala de tempo).

A Tabela 3 mostra alguns possíveis cenários de análise utilizados neste estudo. Em função de cada cenário, são considerados os cálculos temporais, em uma data de interesse, para análise de um evento, na série histórica. Na escala diária, como critérios de avaliação no conjunto formado pelos dias registrados do mês, são formalizadas as seguintes opções de configuração para processamento dos dados, como as seguintes:

1. Último dia observado de cada mês;
2. Primeiro dia observado de cada mês;
3. Critério pessimista: considera o dia do mês, com o maior valor de referência (cota); e,
4. Critério otimista: considera o dia do mês, com o menor valor de referência (cota).

As séries históricas de cotas disponíveis para o açude Castanhão (ROI 0) registram informações de maio de 2002 a setembro de 2009. Os anos de 2002 e 2003 foram desconsiderados, por corresponderem ao período de enchimento inicial do açude, com a cota do nível d'água abaixo de 100,00m, caracterizando um ambiente de certeza, fora do objetivo proposto.

Quanto aos critérios ditos colaborativos, configurados como método de conferência, dada à falta de dados de decisão, considerou-se um peso 1, no caso do valor de referência (vazão) inferior ou igual a 22,0 m<sup>3</sup>/s, correspondendo à vazão de regularização; caso contrário, foi considerado um peso zero, ou não impactante.

Para cada data avaliada, julgou-se por bem considerar, como falha, um resultado não admissível, face a critérios em escala crescente de prioridade:

1. Falha D>  $\rightarrow [D] > 0$  e  $[O] > Q$   
(liberou mais que o sugerido);
2. Falha D<  $\rightarrow [D] < 0$  e  $[O] < Q$   
(liberou menos que o sugerido);
3. Falha E>  $\rightarrow [E] > [C] \times \text{Fator}\%$   
(liberou mais que o aceitável); e
4. Falha E<  $\rightarrow [E] < [C] \times \text{Fator}\%$   
(liberou menos que o aceitável).

Onde: D é a demanda, O a vazão observada, Q a vazão de regularização, C a vazão calculada por

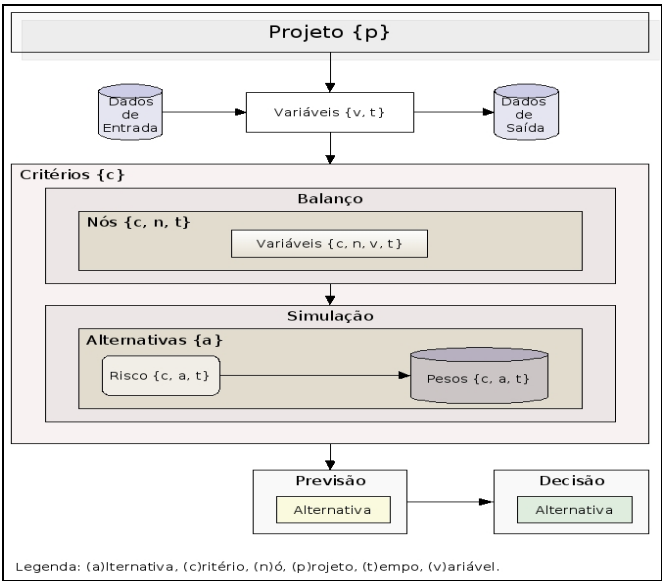


Figura 7 - Diagrama de execução

Tabela 3 - Cenários avaliados

ROI	CENÁRIOS						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Castanhão	+	+	+	+	+	+	+
Alto Jaguaribe	-	+	-	-	+	+	+
Salgado	-	-	+	-	+	+	+
Baixo Jaguaribe	-	-	-	+	-	+	+
Banabuiú	-	-	-	-	-	-	+

Legenda: + (Ativo); - (Inativo).

simulação e Fator% um percentual de segurança, experimental, que se deseja em relação a uma resposta (C) de uma ROI.

Na fase de análise, e segundo as sugestões apresentadas, o decisor avalia o resultado do sistema. Caso a decisão sugerida não seja coerente, para o decisor, ou grupo de decisores, torna-se necessário rever os parâmetros adotados e a qualidade dos dados utilizados.

No caso de modificações nos parâmetros do sistema, a recomendação é voltar à fase de planejamento, seguida de uma nova execução do modelo (Fase de execução).

RESULTADOS

Após o processamento integrado, para cada configuração e cenário escolhidos, segundo as

influências em cada ROI, foram obtidos os resultados parciais com as alternativas de análise de escala temporal, mostrados com visões no passado, presente e futuro.

Os resultados apontam falhas, observadas entre o procedimento sistêmico e as decisões tomadas (liberação de vazões), no período de tempo considerado. A avaliação, no presente, pelo não acoplamento da recepção dos dados telemétricos, foi realizada com o último registro localizado da série de monitoramento hidrológico; quanto à previsão futura, realizou-se a avaliação apenas com a variação linear do cálculo, na data pré-estabelecida, podendo a mesma ser melhorada, com a aplicação de outros algoritmos, principalmente de Redes Neurais Artificiais (RNA).

**Tabela 4 - Falhas (%). Visão do passado: última cota observada no mês**

Ano	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Média
2004	50,00	25,00	50,00	50,00	50,00	50,00	75,00	50,00
2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	27,27	27,27	27,27	27,27	36,36	36,36	36,36	31,17
2007	36,36	36,36	36,36	36,36	36,36	36,36	36,36	36,36
2008	36,36	54,55	54,55	54,55	54,55	54,55	63,64	53,25
2009	22,22	22,22	22,22	22,22	22,22	22,22	22,22	22,22
Média	28,70	27,57	31,73	31,73	33,25	33,25	38,93	32,17
Desv. Pad.	16,96	17,89	19,97	19,97	19,90	19,90	27,27	20,27
<	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>	50,00	54,55	54,55	54,55	54,55	54,55	75,00	56,82

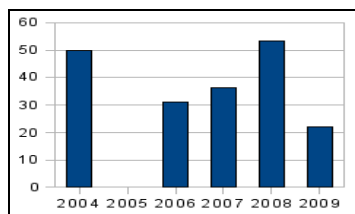
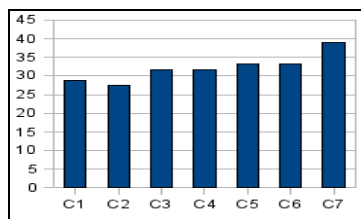
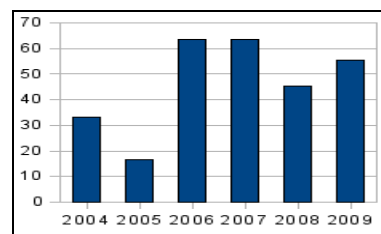
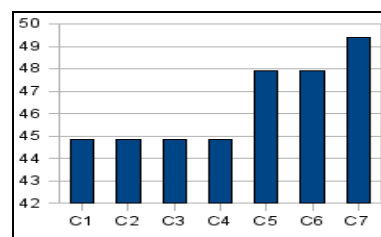
**Tabela 5 - Falhas (%). Visão do passado: primeira cota observada no mês**

Ano	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Média
2004	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33
2005	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
2006	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64
2007	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64
2008	36,36	36,36	36,36	36,36	54,55	54,55	63,64	45,45
2009	55,56	55,56	55,56	55,56	55,56	55,56	55,56	55,56
Média	44,87	44,87	44,87	44,87	47,90	47,90	49,41	46,38
Desv. Pad.	19,08	19,08	19,08	19,08	18,90	18,90	19,88	19,14
<	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
>	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64

Visão do passado (Cotas observadas no mês)

2. Primeira cota (Tabela 5, figuras 10 e 11)

1. Última cota (Tabela 4, figuras 8 e 9)

**Figura 8 - Falhas médias anuais (%)****Figura 9 - Falhas médias dos cenários (%)****Figura 10 - Falhas médias anuais (%)****Figura 11 - Falhas médias dos cenários (%)**

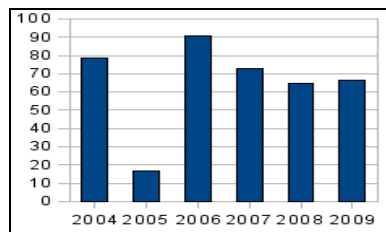
**Tabela 6** - Falhas (%). Visão do passado com critério pessimista: maior cota observada no mês

Ano	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Média
2004	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	100,00	78,57
2005	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
2006	90,91	90,91	90,91	90,91	90,91	90,91	90,91	90,91
2007	72,73	72,73	72,73	72,73	72,73	72,73	72,73	72,73
2008	36,36	63,64	63,64	54,55	72,73	72,73	90,91	64,94
2009	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67
Média	59,72	64,27	64,27	62,76	65,79	65,79	72,98	65,08
Desv. Pad.	27,65	25,17	25,17	25,49	25,40	25,40	30,28	26,37
<	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67
>	90,91	90,91	90,91	90,91	90,91	90,91	100,00	92,21

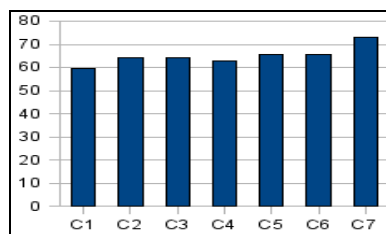
**Tabela 7** - Falhas (%). Visão do passado com critério otimista: menor cota observada no mês

Ano	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Média
2004	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33
2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	18,18	18,18	18,18	18,18	27,27	27,27	27,27	22,08
2007	45,45	45,45	45,45	36,36	45,45	45,45	45,45	44,15
2008	27,27	27,27	27,27	27,27	27,27	27,27	27,27	27,27
2009	44,44	44,44	44,44	44,44	44,44	44,44	44,44	44,44
Média	28,11	28,11	28,11	26,60	29,63	29,63	29,63	28,54
Desv. Pad.	17,23	17,23	17,23	15,73	16,57	16,57	16,57	16,73
<	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>	45,45	45,45	45,45	44,44	45,45	45,45	45,45	45,31

3. Critério pessimista: maior cota (Tabela 6, figuras 12 e 13)

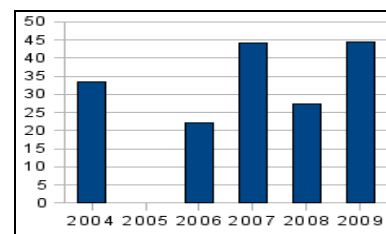


**Figura 12** - Falhas médias anuais (%)

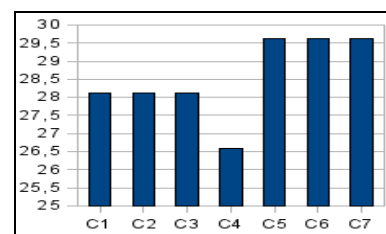


**Figura 13** - Falhas médias dos cenários (%)

4. Critério otimista: menor cota (Tabela 7, figuras 14 e 15)



**Figura 14** - Falhas médias anuais (%)



**Figura 15** - Falhas médias dos cenários (%)

Tabela 8 - Resumo das falhas (%) com visão do passado

Ano	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Média
2004	47,92	41,67	47,92	47,92	47,92	47,92	60,42	48,81
2005	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34
2006	50,00	50,00	50,00	50,00	54,55	54,55	54,55	51,95
2007	54,55	54,55	54,55	52,27	54,55	54,55	54,55	54,22
2008	34,09	45,46	45,46	43,18	52,28	52,28	61,37	47,73
2009	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22
Média	40,35	41,20	42,25	41,49	44,14	44,14	47,74	43,04
Desv.Pad.	17,11	16,67	16,90	16,52	17,82	17,82	19,96	17,54
CV	0,42	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,42	0,41
<	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34	8,34
>	54,55	54,55	54,55	52,27	54,55	54,55	61,37	55,19

### Resumo da visão no passado

A Tabela 8 e as figuras 16 e 17, resumem o processamento com as diversas análises, nas alternativas de tempo e escala consideradas para os cenários estabelecidos.

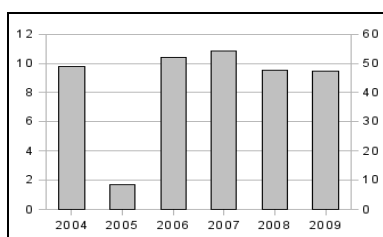


Figura 16 - Falhas médias anuais (%)

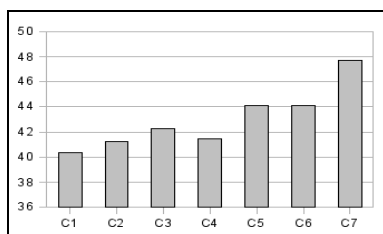


Figura 17 - Falhas médias dos cenários (%)

Observou-se que:

1. Conforme a Figura 12, as médias anuais de falhas de decisões ficaram aproximadamente em 50% , com exceção do ano de 2005, em que as cotas registradas ficaram, na grande maioria, abaixo de 100,00m, ou seja, abaixo da zona de risco; e,
2. Conforme a Figura 13, como esperado, as médias das falhas de decisões aumentaram

com a complexidade do cenário, mesmo assim, ainda acima de 40%. O aumento das falhas com a complexidade do cenário indica, também, uma falta de conhecimento do sistema holístico, sem desprezar, contudo, a natureza aleatória das variáveis envolvidas.

### Visão do presente

A Figura 18 apresenta o resultado dos cálculos efetuados para o dia 21/09/2009, ou seja, as últimas informações disponibilizadas para o reservatório Castanhão, por ocasião desse processamento computacional. De acordo com os cálculos realizados, nesta data específica, a cota teve uma diminuição de 14cm em relação ao último dia observado. Nesta configuração, o balanço hídrico apresentou um valor de aproximadamente -52,26 m<sup>3</sup>/s, registrando, assim, uma perda de volume. A sugestão de decisão é, então, a primeira alternativa, ou seja, o reservatório nada deve liberar de vazão.

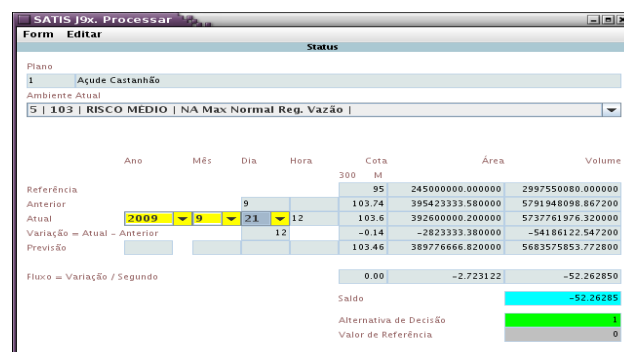


Figura 18 - Visão do presente. Fonte: VIRTVS (2009)

## Visão do futuro

Ainda de acordo com o resultado dos cálculos apresentados na Figura 18, para o dia seguinte, segundo a escala diária estipulada, nada deverá ser liberado de vazão, visto que a cota provavelmente continuará a diminuir. Esta previsão foi realizada com base em uma variação linear simples, podendo ser melhorada bastante com outros métodos numéricos mais eficazes.

## CONCLUSÕES

Uma das técnicas mais usadas, para solução de problemas que envolvem o planejamento de recursos hídricos, é a simulação, onde, através da criação de cenários futuros, o presente é preparado para as possíveis adversidades. As variáveis envolvidas devem estar relacionadas, entre si, através de vários modelos; as operações devem, pois, ser integradas, para o aproveitamento racional dos recursos hídricos, servindo de base para as tomadas de decisão. As simulações, em diferentes cenários hidroclimatológicos, possibilitarão ao gestor antecipar-se aos eventuais problemas, provendo mecanismos para o desenvolvimento sustentável.

O modelo integrado de análise, é recomendado para a aplicação, principalmente no semiárido brasileiro, onde a falta de recursos financeiros é secular e, o que for economizado com o planejamento e gestão, poderá ser revertido no fomento aos compromissos sociais.

O planejamento das operações de sistemas de reservatórios é, possivelmente, o momento em que mais se emprega a programação dinâmica. Considerando um cenário complexo, deverá haver clareza em relação às responsabilidades de execução, e as decisões somente serão politicamente viáveis, se houver razoável certeza de serem atingidas as metas traçadas.

Com frequência, os modelos de previsão não examinam os fenômenos hidrológicos no contexto geográfico, utilizando apenas uma representação simplificada dos elementos espaciais, assumindo a bacia hidrográfica uma condição uniforme. Essas limitações podem ser superadas, com a utilização de modelos semi-distribuídos ou distribuídos, capazes de permitir a detecção de efeitos e anomalias locais, de forma a considerar a heterogeneidade fisiográfica das bacias e a espacialização das simulações (TUCCI, 1998). Ferramentas de Sistemas de Informações

Geográficas (SIG) são valiosas, nesse contexto, para manipulação desses dados, possibilitando uma visão integrada do sistema holístico. Concluímos que:

1. As decisões, frequentemente, são falhas e tardias, apontando para a necessidade de uma maior integração entre os agentes decisores e para o melhoramento da rede de informática e telecomunicação; e,
2. A falta de percepção sistêmica do ambiente leva a operações equivocadas, retendo água no reservatório quando se deveria liberar, ou liberando quando se deveria reter. Os fenômenos das enchentes e escassez hídrica permanecem aterrorizando a região de análise.

Com base no estudo sugere-se:

### I. Para trabalhos futuros:

(1) promover a integração de modelos de otimização; (2) adicionar ao SAD operação, com níveis de alerta, em tempo real; (3) incorporar modelos baseados em redes neurais artificiais, para previsão de eventos futuros, em curto e médio horizontes; (4) observar e analisar as consequências e impactos das decisões tomadas, continuamente.

### II. Para os operadores do reservatório:

(1) promover efetividade na rede de comunicação; (2) criar um ambiente colaborativo, para as conferências de decisão; (3) aceitar, com humildade, a condição de que, somente com a união do conhecimento multidisciplinar e ações conjuntas, há sustentabilidade e resultados positivos das ações tomadas.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN R. G. et al. *Lysimeters forevapopotranspiration and environmental measurements. In: Proceedings of the International Symposium on Lysimetry*. ASCE, 1991. 456p.
- ANDRADE, E. L. *Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisão*. 2a Ed., LTC, Rio de Janeiro, 2000.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. *Multiple criteria decision analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BRAGA, Jr., B. P. F. *Técnicas de otimização e simulação*

aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: *MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: NOBEL/ABRH. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, V.1), 1987.

CAMPOS, J. N.B. *Hidrologia dereservatórios: a construção de uma teoria*. Fortaleza: ASTEF, 2006.

CLÍMACO, J. C. N. *A critical reflection on optimal decision*. European Journal of Operational Research, 153, 506-516. 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. Engenharia. In: CASTANHÃO. Fortaleza: DNOCS, 2009. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M.A. *Metodologia científica*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

OLSON, D. L. Comparison of threemulticriteria methods to predictknown outcomes. *European Journal of Operational Research*, v. 130, p. 576-587, 2001.

PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de suporte a decisões aplicadas a problemas de recursos hídricos. In: *TÉCNICAS quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS – ABRH, 2002.

BURKE, E.; HART, E.; KENDALL, G.; NEWALL, J. ROSS, P.; SCHULENBURG, S. Hyper-heuristics: an emerging direction in modern search technology. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of Metaheuristics*. U.S.: springer, 2003. p. 457-474. (International series in operations research & management science, v. 57).

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: ABRH Editora da UFRGS, 1998.

VIEIRA, V. P. B. *Análise de riscos em recursos hídricos: – fundamentos e aplicações*. 1. ed. Porto Alegre: ABRH Editora da UFRGS, 2005. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 10).

VIRTVS. Satis.In: MANUAL. Fortaleza: VIRTVS Engenharia, 2009. 1 CD-ROM.

## **Dynamic Risk Analysis, A Hyper-heuristic Hybrid Decision Support For Reservoir Operation**

### **ABSTRACT**

The management of water accumulation reservoirs is currently a complex and controversial topic, , involving operational procedures that have not yet been solved, because of different factors in the holistic environment, including political differences, lack of communication between managers and the effects of climate changes. Thus we describe a computer model, within a hyper-heuristic hybrid approach with multicriteria analysis and methodology of dynamic risk analysis. This design consists of the integration of hydrologic models, simulation, decision support and risk analysis into a real and present scenario, where, with the multicriteria analysis and consideration of appropriate alternatives of benefits, a formal decision is feasible and fair. The results of this study clearly show the failures encountered in the operation of Castanhão reservoir in the state of Ceará, which is of public domain and the main target of our attention. Thus the need for participatory management is deduced as well as the use of technological tools of information technology and telecommunications, that enable this integration in real time for critical events such as floods, without neglecting non-standardized historical studies of past operations.

**Keywords:** Risk analysis, heuristics, decision support..