

Relatório Técnico

Nº/Ano: 1319/2019_a **Nº de Páginas:** 42 **Nº de Anexos:**

Título: Sistema SPEC – Sistema de Prevenção de Cheias – DIANA 5.1, SIMRESC 1.0.1, CAEV 3.10, VESPO 4.0 e AUXARISCO 1.0.2 – Manual de Metodologia

Departamento: Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Área de Responsabilidade: B200 **Conta de Apropriação:** 1328

Cliente: Centrais Elétricas Brasileiras S/A – Eletrobras Av. Presidente Vargas, 409 – CEP: 20071-003 Rio de Janeiro/RJ Atenção: Márcio Antônio Guedes Drummond	Equipe de Acompanhamento: Jonatan Ross - Eletrobras Marcelo Jaques Martins – Eletrobras
---	--

Resumo:
Este relatório descreve as principais características metodológicas do Sistema SPEC, correspondente às versões DIANA 5.1, SIMRESC 1.0.1, CAEV 3.10, VESPO 4.0 e AUXARISCO 1.0.2.

Autores:
Igor Pinheiro Raupp – Cepel
Fernanda da Serra Costa – Cepel
Jorge Machado Damázio – Cepel
Priscilla Dafne Shu Chan – Cepel
Daniela de Souza Kyrillos – Cepel

Palavras-Chave:
Controle de Cheias
Usinas Hidrelétricas
Séries sintéticas de vazões
Volumes de espera
Classificação: CONTROLADO

Gerente de Projeto

Fernanda da Serra Costa
Tel.: 2598-6411
E-mail: fernanda@cepel.br

Chefe do Departamento DEA

André Luiz Diniz Souto Lima
Tel.: 2598-6046
E-mail: diniz@cepel.br

Aprovação

Raul Balbi Soiero
Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
27/12/2019

Sistema SPEC

Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias

DIANA versão 5.1

SIMRESC versão 1.0.1

CAEV versão 3.10

VESPOT versão 4.0

AUXARISCO versão 1.0.2

MANUAL DE METODOLOGIA

Fevereiro 2019

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. SISTEMA SPEC	5
3. MÓDULO DIANA: GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES DIÁRIAS	8
3.1. GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS NÃO CONDICIONADAS	9
3.1.1. Abordagem univariada	10
3.1.2. Extensão para o caso multivariado	13
3.1.3. Análise do desempenho do modelo	15
3.2. GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS CONDICIONADA	16
3.2.1. Seleção da série sintética condicionada para utilização no programa OPCHEN	18
3.3. GERAÇÃO CONDICIONADA A FENÔMENOS MACROCLIMÁTICOS	18
4. MÓDULO SIMRESC: SIMULAÇÃO DE APROVEITAMENTOS SEM CONTROLE DE DEFLUÊNCIAS	22
5. MÓDULO CAEV: CÁLCULO DOS VOLUMES DE ESPERA POR SISTEMAS PARCIAIS	26
5.1. SISTEMA COM 1 RESERVATÓRIO E 1 PONTO DE CONTROLE DE CHEIAS	27
5.1.1. Abordagem determinística	27
5.1.2. Abordagem estocástica	28
5.2. SISTEMA COM N RESERVATÓRIO E M PONTO DE CONTROLE DE CHEIAS	29
6. MÓDULO VESPOT: DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DOS VOLUMES DE ESPERA PELOS RESERVATÓRIOS	33
7. MÓDULO AUXARISCO	35
8. REFERÊNCIAS	36
ANEXO A. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS VOLUMES DE ESPERA	39
A.1. INTRODUÇÃO	39
A.2. FORMULAÇÃO LINEAR ESTOCÁSTICA DA ALOCAÇÃO DE VOLUMES DE ESPERA EM SISTEMAS MULTI-RESERVATÓRIOS	40
A.2.1. Definição de funções-objetivo	42

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos estudos e atividades do planejamento da operação do Setor Elétrico, incluem-se os Estudos de Prevenção de Cheias, no qual se define a utilização, durante a estação chuvosa, de parte da capacidade dos reservatórios dos aproveitamentos hidroelétricos como volumes de espera, com vistas à redução de danos causados por cheias de grande porte em áreas a jusante dos reservatórios. Esta alocação deve ser feita cuidadosamente de forma a se evitar desperdícios, minimizando os riscos de geração térmica ou de déficits de suprimentos nos sistemas interligados.

O uso dos reservatórios das usinas hidroelétricas para controle de cheias necessita que se defina:

- os pontos de controle de cheias: locais onde existe limite máximo de vazão, de forma a não causar danos no vale a jusante; e
- o grau de proteção dos pontos de controle que será fornecido pelos reservatórios. O grau de proteção está associado ao risco (tempo de retorno) de ultrapassar o limite máximo de vazão estabelecido.

Definidos estes parâmetros passa-se ao cálculo dos volumes de espera. Para apoiar os Estudos de Prevenção de Cheias foi desenvolvido, pelo CEPEL, o sistema SPEC (*Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias*) [1][2]. Este sistema tem como foco principal a análise de sistemas com multireservatórios e com múltiplos pontos de controle de cheias situados em bacias hidrográficas cujas hidrologias apresentam variações intranuais (sazonalidade).

O sistema SPEC agrega cinco módulos:

- DIANA: conjunto de funções de modelagem estocástica e geração de séries sintéticas de afluências [3][4][5];
- SIMRESC: função para simulação da operação de usinas hidroelétricas com reservatórios sem controle de defluências;
- CAEV: função para cálculo de curvas de volumes de espera por sistemas parciais¹ condicionada a uma alternativa de proteção contra cheias [6];
- VESPOT: função para desagregação das curvas de volume de espera para os sistemas

¹Conjunto de usinas hidroelétricas a montante de um ponto de controle de cheias que formam um reservatório equivalente.

parciais, calculadas pelo CAEV, em curvas individualizadas para cada reservatório do sistema [7]; e

- AUXARISCO: função que altera os volumes de espera das envoltórias calculadas pelo CAEV de forma que estes sejam crescentes (não necessariamente monotonamente crescente) com os tempos de retorno.

Diferentes conjuntos de alocação de volumes de espera, correspondentes a diferentes alternativas de proteção contra cheias, são a informação básica necessária para os estudos de riscos de geração térmica e déficit de suprimento e conseqüente decisão quanto à proteção contra cheias a ser oferecida ao vale.

Este relatório apresenta os principais aspectos metodológicos do sistema SPEC.

2. SISTEMA SPEC

O cálculo dos volumes de espera, nos Estudos de Prevenção de Cheias, apresenta alguns desafios, quais sejam:

- o desconhecimento das vazões que irão ocorrer durante a estação chuvosa. No sistema SPEC a incerteza hidrológica é representada através do uso de conjuntos de séries sintéticas de afluências diárias ao sistema de reservatórios. O conjunto de séries sintéticas é obtido pelo ajuste de um modelo estocástico ao histórico de afluências (modelo DIANA). A incorporação de informações macroclimáticas [8], como a ENSO (El Niño – Oscilação Sul), reduz a incerteza hidrológica. A forma adotada no sistema SPEC para incorporação desta informação, na geração das séries sintéticas, se dá através da divisão do histórico de afluências em subconjuntos associados a diferentes fases da ENSO. No ajuste do modelo estocástico considera-se então o subconjunto associado a fase da ENSO prevista de ocorrer durante a estação chuvosa; e
- a consideração de sistemas com múltiplos pontos de controle de cheias e com diversos reservatórios. Neste tipo de sistema é interessante que os volumes de espera, necessários para a proteção dos pontos de controle de cheia, possam ser distribuídos por todos os reservatórios do sistema, de forma a não reduzir excessivamente a capacidade de armazenamento dos reservatórios imediatamente a montante dos pontos de controle. No sistema SPEC, este problema é resolvido pela Teoria das Condições de Controlabilidade [9][10].

A alternativa de proteção contra cheias que o setor elétrico oferece ao vale é representada por um conjunto de tempos de retorno para cada ponto de controle, a cada ponto de controle de cheia se associa também uma vazão máxima, acima da qual ocorrem danos no vale a jusante. O sistema de reservatórios é decomposto em sistemas parciais e para cada sistema parcial calcula-se uma curva-guia superior para toda a estação chuvosa (curva de volume de espera), tomada como a envoltória de trajetórias do seu volume armazenado críticas sob o ponto de vista do controle de cheias, durante a estação chuvosa (modelo CAEV).

Para o cálculo da envoltória, utilizam-se apenas trajetórias críticas de séries sintéticas pré-escolhidas para serem protegidas no conjunto correspondente à fase da ENSO considerada no estudo. O número de séries a serem protegidas para cada um dos sistemas parciais é proporcional à proteção (tempo de retorno) desejada para o seu ponto de controle de cheias, enquanto que, a escolha de quais séries serão protegidas é feita de forma a otimizar uma função de interesse energético.

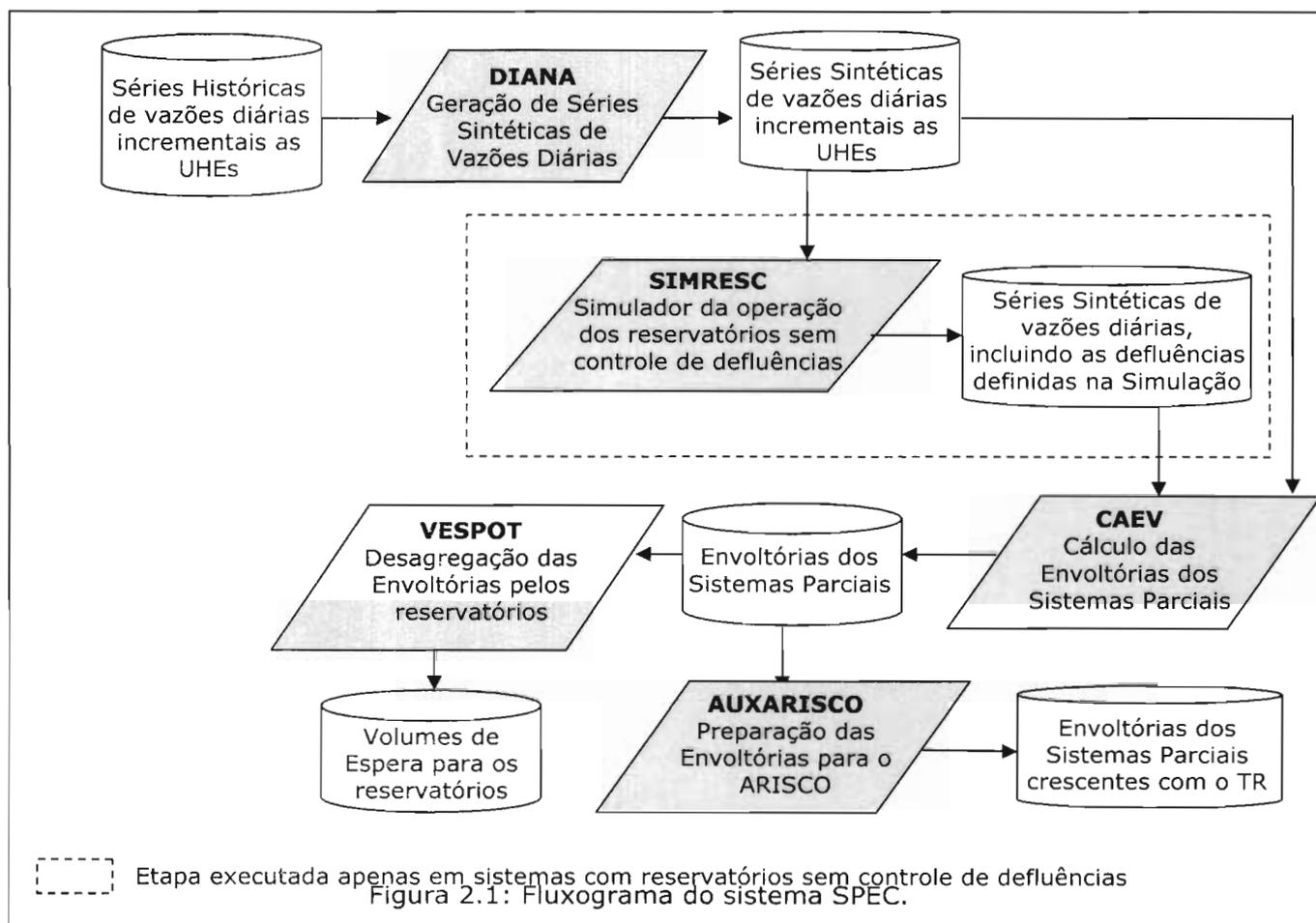
O problema da desagregação espacial de curvas de volumes de espera dos sistemas parciais em curvas individualizadas para cada reservatório do sistema é formulado como um problema linear estocástico, onde a função objetivo é desenhada de forma a evitar alocações de volumes de espera desequilibradas, resultando em deplecionamentos exagerados de alguns reservatórios, que comprometam a capacidade de geração do sistema. Como técnicas de solução, faz-se uso da decomposição de Benders e algoritmos de fluxo em redes, utilizando-se as envoltórias dos sistemas parciais para acelerar a convergência do método (modelo VESPOT).

As principais características do sistema SPEC são:

1. Permite considerar sistemas com mais de um ponto de controle de cheias e com diferentes tempos de retorno;
2. Permite considerar sistemas com limitações de defluências mínimas;
3. Define automaticamente os sistemas parciais;
4. Permite considerar conjuntos de séries sintéticas de afluições diárias igualmente prováveis condicionadas ou não a fases da ENSO;
5. A "alternativa de proteção" considerada para bacia compreende um conjunto de tempos de retornos, um para cada ponto de controle do sistema, os tempos de retorno podem ser diferentes para cada ponto de controle de cheias;
6. O módulo DIANA é formado por sete funções: ENSOCLAS, AUXAJUS, EPN, EEN, GEP, COMPARA e ESCSER;
7. O módulo SIMRESC pode realizar a simulação da operação dos reservatórios das usinas hidroelétricas que não possuem controle de defluências considerando o histórico de afluições diárias ou o conjunto de séries sintéticas de vazões diárias geradas pelo módulo DIANA.
8. Para o cálculo de envoltórias (modelo CAEV) existem duas opções para escolher as séries que não serão protegidas: minimização da perda de potência disponível durante a estação chuvosa, (critério da máxima flecha) ou, maximização da probabilidade de enchimento completo do sistema ao final da estação chuvosa, (critério do máximo reenchimento);
9. Para a alocação de volumes de espera em reservatórios (modelo VESPOT) existem três opções de função-objetivo: alocação proporcional ou por faixas e prioridades ou por prioridades considerando limite inferior;
10. Possui ainda o programa AUXARISCO que foi desenvolvido para garantir que os volumes de

espera das envoltórias calculadas pelo CAEV sejam crescentes com os tempos de retorno.

Na Figura 2.1 é apresentado o fluxograma do sistema SPEC.



O uso do sistema SPEC para o cálculo de volumes de espera a serem alocados nos reservatórios das usinas hidroelétricas nos Estudos de Prevenção de Cheias foi aprovado pelo GTHO/GCOI e teve sua primeira aplicação na estação chuvosa 1997/1998, na bacia do rio Paraná [11].

3. MÓDULO DIANA: GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES DIÁRIAS

O módulo DIANA é composto por sete funções. São elas:

1. ENSOCLAS: função para classificação dos anos do registro histórico de afluências, segundo as fases da ENSO, tendo como base análises conjuntas de séries de medições de indicadores/índices associados as fases da ENSO e índices de intensidade de cheias. Tem como objetivo a geração de séries sintéticas de vazões diárias condicionadas às fases da ENSO através do modelo DIANA;
2. AUXAJUS: ajuste automático, de forma univariada, do modelo DIANA;
3. EPN: estimação dos parâmetros pontuais do modelo DIANA, tais como, coeficiente de autocorrelação lag-1, distribuição empírica das taxas de recessão, distribuição empírica das vazões iniciais etc.;
4. EEN: estimação dos parâmetros espaciais do modelo DIANA, para a geração multivariada;
5. GEP: geração uni/multivariada de séries sintéticas de vazões diárias (totais ou incrementais) de forma condicionada ou não condicionada;
6. COMPARA: análise do desempenho do modelo, através de comparações das estatísticas das séries históricas e sintéticas de vazões diárias; e
7. ESCSER: ordenação das séries sintéticas em função do volume de espera máximo considerando um dos critérios: máxima tangente ou máximo volume de espera. Para a série selecionada, imprime arquivo formatado contendo as vazões semanais associadas à série escolhida para todos os postos. Esta função foi desenvolvida para auxiliar a seleção da série a ser utilizada no programa OPCHEN [12][13] na metodologia desenvolvida para auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de controle de cheias (envoltórias) [14][15].

Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma das sete funções que formam o módulo DIANA.

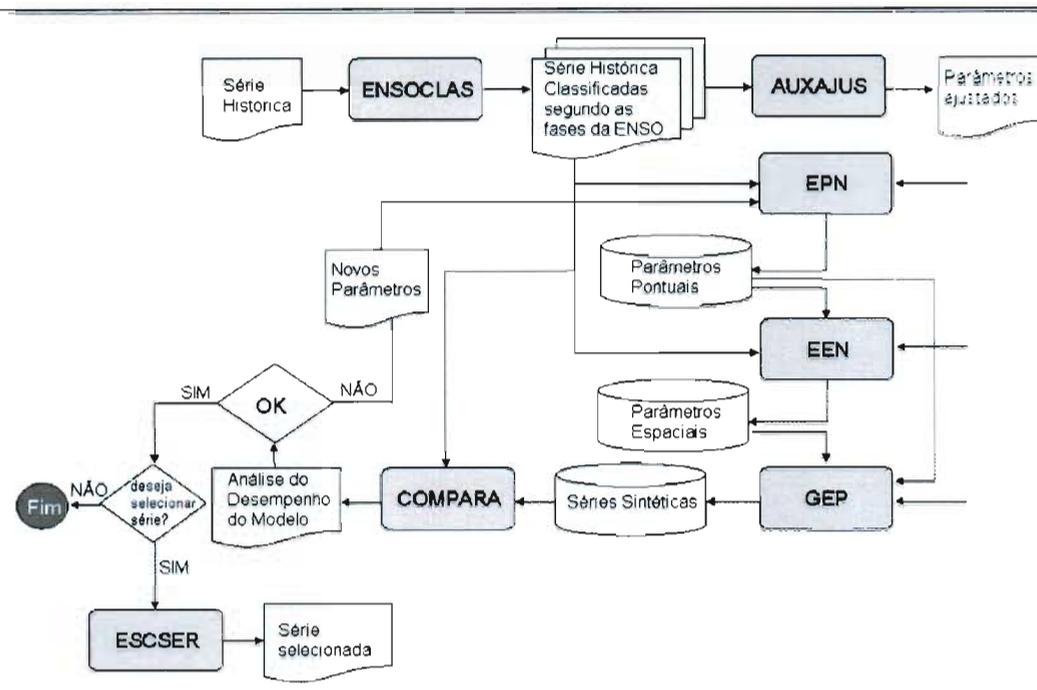


Figura 3.1: Fluxograma do módulo DIANA.

O modelo DIANA [5] é um modelo estocástico multivariado de geração de séries sintéticas de afluições diárias. O modelo foi desenvolvido de forma a reproduzir características marcantes e difíceis de serem modeladas das séries de afluições diárias, tais como, exageradas assimetrias, forte sazonalidade e a diversidade dos ramos de ascensão e recessão das hidrógrafas.

Inicialmente o modelo DIANA foi desenvolvido para a geração de séries sintéticas de vazões diárias não condicionadas. Posteriormente o modelo foi adaptado para a geração condicionada visando, a metodologia desenvolvida para auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de controle de cheias (envoltórias) durante o planejamento da operação de curto prazo. Uma nova função (ENSOCLAS) foi desenvolvida para introdução da consideração de variáveis macroclimáticas, mais especificamente a ENSO (El Niño-Oscilação Sul) no planejamento de controle de cheias.

3.1. GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS NÃO CONDICIONADAS

O modelo DIANA é um modelo estocástico multivariado de geração de séries sintéticas de afluições diárias, podendo também ser usado de forma univariada.

3.1.1. Abordagem univariada

A formulação do modelo DIANA baseia-se na idéia que as vazões diárias podem ser decompostas em duas parcelas: uma parcela dependente de fatores externos (por exemplo, precipitação) e outra que representa o contínuo esvaziamento da bacia.

Considera-se que a vazão no dia t da hidrógrafa de um dado posto fluviométrico é dada pela soma de dois componentes:

$$Q(t) = U(t) + O(t), t = 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

Idealmente, $U(t)$ dependeria principalmente de fatores externos (ex.: precipitações) cuja natureza intermitente ocasionaria na hidrógrafa pulsos irregularmente espaçados no tempo. Por outro lado, $O(t)$ representaria o contínuo esvaziamento da água armazenada na bacia hidrográfica.

O modelo DIANA considera a ocorrência de $u(t)$ positivo sempre que $q(t) > \lambda q(t-1)$, onde $0 \leq \lambda \leq 1$ é uma *taxa de recessão característica* do posto fluviométrico.

Para qualquer λ a opção implica que:

$$\begin{aligned} u(t) &= 0 && \text{se } q(t) \leq \lambda q(t-1) \\ u(t) &= q(t) - \lambda q(t-1) && \text{se } q(t) > \lambda q(t-1) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Nos dias em que atuam fatores externos ($u(t) > 0$), a vazão total é dada por:

$$q(t) = \lambda q(t-1) + u(t), \quad u(t) > 0 \quad (3.3)$$

e, portanto:

$$O(t) = \lambda q(t-1), \quad u(t) > 0 \quad (3.4)$$

Nos dias em que não atuam fatores externos ($u(t) = 0$), a vazão total é dada simplesmente por $O(t)$, o qual pode ser considerado como a soma das defluências de dois reservatórios lineares, cada parcela dependendo de $q(t-1)$ através de uma equação probabilística. Esta abordagem pode ser simplificada considerando-se apenas um reservatório linear de comportamento estocástico. Assim, quando $u(t) = 0$, $q(t) = O(t)$, e, portanto, $q(t)$, é uma fração $k(t) \leq \lambda$ da vazão anterior:

$$q(t) = O(t) = k(t) q(t-1), \quad k(t) \leq \lambda; \quad u(t) = 0 \quad (3.5)$$

Juntando-se as equações (3.1), (3.3) e (3.5) o modelo DIANA pode ser escrito por:

$$\begin{cases} q(t) = u(t) + k(t)q(t-1) \\ u(t) = 0 \Rightarrow k(t) \leq \lambda \\ u(t) > 0 \Rightarrow k(t) = \lambda \end{cases} \quad (3.6)$$

Existem dois aspectos a serem considerados na modelagem do processo $U(t)$:

1. Definir sua distribuição de probabilidade marginal, levando-se em conta que existe uma probabilidade finita p de que $U(t)$ seja exatamente igual a zero;
2. Preservar a dependência entre valores sucessivos de $U(t)$, visto que os fatores externos que influenciam os ramos ascendentes da hidrógrafa podem resultar da ação de fenômenos meteorológicos persistentes sobre a bacia hidrográfica (exemplo: frente fria estacionária).

Para $F_U(\cdot)$ adota-se a própria distribuição empírica, pois usualmente dispõe-se de um grande número de observações de $u(t)$. Em relação a dependência temporal de $U(t)$, assume-se a existência de um processo autoregressivo normal de ordem 1 com censura, cujo coeficiente de autocorrelação ρ deve ser preservado. Este processo é mapeado em $U(t)$ através de uma transformação não-paramétrica que deve preservar a distribuição empírica $F_U(\cdot)$, conforme é exposto a seguir.

Seja o processo markoviano $Z(t)$ definido por:

$$z(t) = \rho z(t-1) + \varepsilon(t)\sqrt{1-\rho^2} \quad (3.7)$$

onde $\varepsilon(t)$ é um ruído normal padrão e ρ a correlação lag-1 do processo markoviano.

Seja o processo $Y(t)$ resultado de uma censura imposta ao processo $Z(t)$ definida por:

$$\begin{aligned} y(t) &= z(t) && \text{se } z(t) > \beta \\ y(t) &= \beta && \text{se } z(t) \leq \beta \\ \beta &= \phi^{-1}(p) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Onde: β define o intervalo de censura $(-\infty, \beta)$;
 $\phi(\cdot)$ é a distribuição acumulada normal; e
 $\rho = P[u(t)=0]$.

A relação entre $U(t)$ e $Y(t)$ é obtida resolvendo-se $F_U(u) = \phi(y(t))$.

Para a modelagem da série de $k(t)$'s assume-se que seja suficiente simplesmente usar para a geração de valores sintéticos a distribuição empírica de $k(t)$ menor que λ , $F_k(\cdot)$, sempre que $u(t) = 0$, e $k(t) = q(t)/q(t-1)$

O algoritmo de geração de séries sintéticas pode ser descrito por:

- i. sortear uma vazão inicial q_0 da distribuição empírica das vazões iniciais $F_Q(\cdot)$
- ii. sortear um valor inicial $z(0)$ da distribuição normal padrão $\phi(\cdot)$
- iii. fazer $t = 1$
- iv. sortear um ruído $\varepsilon(t)$ da distribuição normal padrão $\phi(\cdot)$
- v. calcular $z(t) = \rho z(t-1) + \varepsilon(t) \sqrt{1 - \rho^2}$ e fazer $y(t) = \max(\beta, z(t))$
- vi. obter $u(t)$ resolvendo $F_U(u) = \phi(y(t))$
- vii. se $u(t) > 0$ obter $q(t) = u(t) + \lambda q(t-1)$. Se $u(t)=0$ sortear $k(t)$ de $F_K(\cdot)$ e obter $q(t)=k(t) q(t-1)$
- viii. fazer $t = t + 1$ e retornar a (iv)

3.1.1.1. Estimação dos Parâmetros

Dada uma série histórica de vazões diárias $q(0), q(1), \dots, q(h)$ e para uma taxa de recessão característica λ , é possível obter uma série $u(1), u(2), \dots, u(h)$ correspondente através da equação (3.2).

Para obtenção da correspondente série de $y(t)$, a série $u(t)$ é arrumada no vetor $W=(u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_h))$, de tal forma que $u(t_1) \leq u(t_2) \leq \dots \leq u(t_h)$.

Seja m o número de zeros na série $u(t)$. A estimativa de ρ é dada por $\hat{\rho} = \frac{m}{h}$.

A função que mapeia $y(t)$ em $u(t)$ é dada por $u(t)=g[\phi(y(t))]$. Nesta função, para cada $u(t_j) > 0$ existe um intervalo associado $[d_j, e_j]$ relacionado com a sua posição j no vetor ordenado W tal que:

$$\phi(d_j) = \frac{j-1}{h}, \quad j \geq m+1 \tag{3.9a}$$

$$\phi(e_j) = \frac{j}{h}, \quad j \geq m+1 \tag{3.9b}$$

Para $u(t_j)=0$ só existe um valor associado:

$$y(t_j) = \beta, \quad \Phi(\beta) = \frac{m}{h} = \hat{\rho} \tag{3.10}$$

A função g é útil no passo (vi) do esquema de geração para a obtenção de $u(t)$ através da solução da

equação $F_U(u(t)) \cong \Phi(y(t))$, fazendo-se simplesmente $u(t)=g[\Phi(y(t))]$. Por outro lado, a função g não é bionívoca e, conseqüentemente, fica difícil a obtenção das séries históricas dos $y(t)$'s: quando $u(t_j)>0$, é impossível se obter exatamente o valor do $y(t)$ correspondente, conhecendo-se apenas um intervalo viável, $d_j<y(t_j)<e_j$.

A abordagem adotada consiste em se associar a cada $u(t_j)>0$ o valor mediano do intervalo correspondente:

$$\phi(y(j_j)) = \frac{1}{2}[\phi(d_j) + \phi(e_j)] \tag{3.11}$$

Em resumo, ordenada a série de $u(t)$, é possível através das equações (3.9a), (3.9b), (3.10) e (3.11), obter uma realização do processo $Y(t)$. Esta realização pode ser considerada como uma amostra censurada do processo Markoviano padrão $Z(t)$ definido por (3.8) com intervalo de censura $(-\infty, \beta)$. Se os valores nulos de $u(t)$ forem eliminados do registro, a amostra resultante pode ser considerada como uma amostra truncada de $Z(t)$ com nível de truncamento dado por β , a estimativa do parâmetro ρ pode ser feita considerando-se os pares contíguos $(y(t) > \beta, y(t+1) > \beta)$ resultantes como uma amostra de uma distribuição bivariada normal padrão truncada identicamente nas duas variáveis. O parâmetro β é obtido por (3.10) e $\hat{\rho}$ usando-se todos os pares contíguos $(y(t) > \beta, y(t+1) > \beta)$ em:

$$\hat{\rho}' = \frac{\sum (y(t) - \bar{y}_t) (y(t+1) - \bar{y}_{t+1})}{[\sum (y(t) - \bar{y}_t)^2 \sum (y(t+1) - \bar{y}_{t+1})^2]^{1/2}} \tag{3.12}$$

$$\bar{y}_t = \frac{\sum y(t)}{n}; \quad \bar{y}_{t+1} = \frac{\sum y(t+1)}{n} \tag{3.13}$$

Onde n é o número de pares contíguos obtidos. A estimativa de ρ é obtida entrando-se na tabela com $\hat{\rho}'$ e β .

3.1.2. Extensão para o caso multivariado

A extensão do modelo para a geração multivariada, adota o modelo proposto por Matalas [16] para a geração multivariada de variáveis normais padronizadas:

$$Z(t) = A Z(t-1) + B\varepsilon(t) \tag{3.14}$$

Onde: $Z(t)$ é o vetor $[Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_i(t)]^T$;

$Z_i(t)$ é o processo markoviano correspondente ao posto i ; e

$\varepsilon(t)$ é um vetor com L variáveis normais padronizadas independentes.

As matrizes A e B devem ser estimadas de forma a representar tanto a persistência de cada hidrógrafa quanto a correlação existente entre as hidrógrafas representada pela matriz de covariância de $Z(t)$, M_0 .

3.1.2.1. Estimação das Matrizes A e B

De acordo com Matalas [16] o esquema de geração multivariado definido na equação (3.14) deve considerar não só os coeficientes de correlação temporal em cada série, ρ_{i_i} , como as correlações cruzadas entre as séries $\{z_i(t)\}$, $i=1,\dots,L$ representadas pelas correlações cruzadas lag-zero $\rho_{i,j}(0)$ definida por:

$$\rho_{i,j}(0) = E[z_i(t).z_j(t)] \quad \forall i,j \quad (3.15)$$

Para a estimação dos valores de $\rho_{i,j}(0)$, $i \neq j$, pode-se considerar o conjunto dos pares $(y_i(t) > \beta_i, y_j(t) > \beta_j)$ como uma amostra aleatória de uma distribuição normal bivariada padrão com correlação $\rho_{i,j}(0)$ a estimar e truncada em β_i e β_j .

O cálculo das matrizes A e B correspondentes as estimativas de ρ_{i_i} , $\rho_{i,j}(0)$, $i=1,\dots,L$; $j=1,\dots,L$ é feita considerando-se as matrizes $M_0 = E[Z_t Z_t^T]$ e $M_1 = E[Z_{t+1} Z_t^T]$. M_0 é uma matriz de dimensão $L \times L$ cujos elementos são dados por:

$$m_0(i,j) = 1; \quad i=j \quad (3.16a)$$

$$m_0(i,j) = \rho_{i,j}(0); \quad i \neq j \quad (3.16b)$$

M_1 é uma matriz de dimensão $L \times L$ cujos elementos são dados por:

$$m_1(i,j) = 1; \quad i=j \quad (3.17a)$$

$$m_1(i,j) = \rho_{i,j}(0) \rho_{i_i}; \quad i \neq j \quad (3.17b)$$

Nota-se que o uso da equação (3.17b) dispensa a estimativa de $\rho_{i,j}(1)$.

A matriz A é dada por:

$$A = M_1 M_0^{-1} \quad (3.18)$$

A matriz B é dada por:

$$B B^T = M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T \quad (3.19)$$

A equação (3.19) não tem solução única e conforme Matalas [16] qualquer uma das soluções

adotadas pode ser usada. O Modelo DIANA adota a solução de componentes principais [16]. A solução das equações (3.18) e (3.19) impõe restrições nos valores dos parâmetros ρ_i e $\rho_{i,j}(0)$, $i=1, \dots, L$; $j=1, \dots, L$ de forma a garantir que as matrizes M_0 e $M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T$ sejam positivas definidas. Estas duas condições podem ser garantidas se a matriz V de dimensão $(2L \times 2L)$, definida em (3.20), for positiva definida.

$$V = E \left[\begin{bmatrix} Z_{t+1} \\ Z_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{t+1}^T & Z_t^T \end{bmatrix} \right] \quad (3.20)$$

Se o conjunto ρ_i e $\rho_{i,j}(0)$, $i=1, \dots, L$; $j=1, \dots, L$ obtido provocar uma matriz V não positiva definida esta matriz é submetida a pequenas perturbações até se obter uma matriz positiva definida. O mesmo método é sugerido por Fiering [17].

3.1.3. Análise do desempenho do modelo

A aplicabilidade em estudos hidrológicos das séries geradas pelo modelo DIANA é aferida pela comparação entre propriedades relevantes ao estudo (neste caso, estudo de cheias) das séries históricas e as correspondentes propriedades das séries geradas para cada posto. Para esta análise são consideradas quatro abordagens:

3.1.3.1. Probabilidade da estatística obtida com a série sintética ser maior que a estatística histórica

Nesta análise as estatísticas consideradas são: média e desvio padrão das vazões diárias e , média e desvio padrão do volume de espera anual. Estas quatro estatísticas são calculadas para as séries histórica e sintética e espera-se que seus valores sejam próximos.

A série sintética é dividida em blocos, cada bloco contendo número de sequencias igual ao número de anos do registro histórico. Para cada bloco são calculados os valores máximo, médio e mínimo das quatro estatísticas, e a probabilidade que o valor da estatística sintética seja maior que o valor da estatística obtido com o histórico de vazões. Se esta probabilidade for muito pequena ou grande, isto é uma indicação de que a observação histórica é atípica para o modelo.

3.1.3.2. Teste Kolmogorov-Smirnov para o volume de espera anual

O teste Kolmogorov-Smirnov é utilizado para comparação das distribuições empíricas dos volumes de espera anuais obtidas a partir das séries histórica e sintética. Estas distribuições são também impressas para análise gráfica.

3.1.3.3. Análise multivariada (conjunta) da média e desvio padrão do volume de espera anual

Nesta análise se considera a divisão da série sintética em blocos conforme descrito no item 3.1.3.1. Representando por $I_M(j)$ e $I_{DP}(j)$ a média e o desvio padrão dos volumes de espera anuais de cada bloco j e, $I_M(\text{hist})$ e $I_{DP}(\text{hist})$ a média e o desvio padrão dos volumes de espera anuais da série histórica. Define-se os vetores $r_{\text{hist}} = [I_M(\text{hist}), I_{DP}(\text{hist})]^T$ $r_{\text{sint}}(j) = [I_M(j), I_{DP}(j)]^T$, $j=1, n^o$ blocos. O conjunto de vetores r_{sint} distribuição de probabilidades multivariada empírica da média e desvio padrão dos volumes de espera anuais. Para cada valor $r_{\text{sint}}(j)$ e para r_{hist} define-se a distância ao centro da distribuição pelo escalar positivo:

$$d_j = (r_{\text{sint}}(j) - \mu)^T \Sigma^{-1} (r_{\text{sint}}(j) - \mu) \quad (3.21)$$

$$d_{\text{hist}} = (r_{\text{hist}} - \mu)^T \Sigma^{-1} (r_{\text{hist}} - \mu) \quad (3.22)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{\text{sint}}(j) \quad (3.23)$$

$$\Sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (r_{\text{sint}}(j) - \mu)(r_{\text{sint}}(j) - \mu)^T \quad (3.24)$$

A variável d_{hist} é então comparada com as distâncias d_j através da proporção de distâncias geradas maiores que a distância histórica, $P[d_j > d_{\text{hist}}]$. O desempenho do modelo será melhor quanto mais próximo de 1 for $P[d_j > d_{\text{hist}}]$.

3.1.3.4. Comparação do comportamento sazonal

Para a comparação do comportamento sazonal das séries histórica e sintéticas são avaliadas, através dos valores impressos em tabelas, as médias e desvio padrão diários para cada mês, além dos valores máximos, médios e mínimos de cada mês, para as séries histórica e sintética. O mesmo tipo de tabela é impressa para a maior cheia e a cheia mediana do histórico e as cheias sintéticas com volumes de espera semelhantes.

3.2. GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS CONDICIONADA

O cálculo dos volumes de espera nos Estudo de Prevenção de Cheias é realizado com bastante antecedência em relação ao início da estação chuvosa. Portanto, na etapa de geração das séries sintéticas, as vazões diárias correspondentes aos dias que antecedem o 1º dia da estação chuvosa são desconhecidas. Desta forma, inicialmente o modelo DIANA foi desenvolvido para a geração não

Relatório Técnico – 1319/2019_a

condicionada de séries sintéticas de vazões diárias. Como descrito no algoritmo de geração de séries sintéticas no item 3.1.1, a vazão correspondente ao dia anterior ao primeiro dia da estação chuvosa é sorteada da distribuição empírica das vazões iniciais $F_Q(\cdot)$, e, o valor inicial do processo markoviano Z é sorteado da distribuição normal padrão $\phi(\cdot)$. Este procedimento é razoável quando o modelo está sendo utilizado para gerar cenários igualmente prováveis de vazões diárias, imaginando-se que se parte de um ponto qualquer, não se tendo como objetivo preservar o comportamento das últimas vazões que realmente ocorreram.

Com o intuito de aumentar a probabilidade de se obter reservatórios cheios ao final da estação chuvosa, foi desenvolvida uma metodologia [14][15] para auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de volume de espera dos reservatórios nos meses finais da estação chuvosa. Nesta metodologia é necessária a geração condicionada de séries sintéticas de vazões diárias a cada semana durante a estação chuvosa. Para atender a esta necessidade o modelo DIANA foi aprimorado para permitir a geração condicionada de vazões diárias, dando origem a sua versão 5.0.3.

Quando o objetivo é incorporar, nas seqüências sintéticas de vazões diárias, as informações das vazões passadas, ou seja, a geração condicionada, é necessário alterar os passos (i) e (ii) do algoritmo de geração de séries sintéticas.

Considerando t o primeiro dia da estação chuvosa, e que as vazões dos dias $t-1$ e $t-2$ são conhecidas, os passos (i) e (ii), do algoritmo de geração de séries sintéticas do modelo DIANA, são alterados conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1: Alteração dos passos (i) e (ii) do algoritmo de geração de séries sintéticas do modelo DIANA para permitir a geração de séries sintéticas condicionada de vazões diárias.

- | |
|--|
| <p>a) calcular a taxa de recessão do dia $t-1$, $k(t-1)$, fazendo: $k(t-1) = q(t-1) / q(t-2)$;</p> <p>b) obter o incremento de vazão para o dia $t-1$, $u(t-1)$ através de:</p> <p>se $k(t-1) < \lambda$, então $u(t-1)=0$</p> <p>se $k(t-1) \geq \lambda$, então $u(t-1) = q(t-1) - \lambda q(t-2)$</p> <p>c) obter o valor do processo resultante da censura imposta a $Z(t)$, $Y(t)$, para o dia $t-1$, $y(t-1)$, através de: $F_U(u(t-1)) = \phi(y(t-1))$</p> <p>d) obter $z(t-1)$, tal que: se $y(t-1) > \beta$, $z(t-1) = \beta$, caso contrário sorteia-se $z(t-1)$ da $N(0,1/(1-\rho^2)^{-1})$.</p> |
|--|

3.2.1. Seleção da série sintética condicionada para utilização no programa OPCHEN

Na metodologia [14][15] para auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de volume de espera dos reservatórios nos meses finais da estação chuvosa, deve-se selecionar uma das séries sintéticas geradas de forma condicionada para representar as afluências que poderão ocorrer no período compreendido entre o dia seguinte ao corrente e o último dia da estação chuvosa. O programa ESCSER foi desenvolvido para atender a esta finalidade.

Para a escolha da série, o programa ESCSER ordena as séries sintéticas condicionadas através de um parâmetro que represente a severidade destas em relação à cheia. O parâmetro adotado é o volume de espera máximo da série, que é calculado através de um dos dois critérios utilizados para o cálculo das trajetórias críticas no módulo CAEV: máximo volume de espera ou máxima tangente. As séries são então ordenadas em ordem decrescente de seus volumes de espera. Seleciona-se a série cujo número de séries com volume de espera maior que o seu é igual ao número de séries não protegidas pelas envoltórias, calculadas pelo módulo CAEV, nos meses finais da estação chuvosa. Esta série de vazões diárias é transformada em vazões semanais para ser utilizada no programa OPCHEN [12][13].

3.3. GERAÇÃO CONDICIONADA A FENÔMENOS MACROCLIMÁTICOS

Com o módulo DIANA é possível incorporar informações de variáveis macroclimáticas à geração, condicionadas ou não, de série sintética de vazões diárias. A metodologia que permite a incorporação de variáveis macroclimáticas no processo de geração de séries sintéticas foi introduzida no módulo DIANA quando da primeira aplicação do sistema SPEC para cálculo de volumes de espera no Sistema Interligado Nacional (SIN), na estação chuvosa 1997/1998, para a bacia do rio Paraná. Inicialmente, a variável macroclimática foi representada pelo Índice de Oscilação Sul (ISO), um dos índices usados para identificar a fase da ENSO (El Niño – Oscilação Sul). Naquela época foi desenvolvido um estudo pelo CEPEL [8], no qual foi identificada relação entre a frequência de ocorrência de cheias com as fases (El Niño, La Niña) da ENSO.

O fenômeno El Niño se manifesta através de um aquecimento da superfície do mar no Pacífico junto à costa da América Latina. Esta situação ocorre devido a um enfraquecimento dos ventos alísios que dificultam o transporte das águas da superfície do Pacífico em direção oeste. Por outro lado, quando ao contrário, existe um fortalecimento dos alísios, este transporte é facilitado, ocorrendo ressurgências de águas profundas na costa oeste da América Latina, que vão provocar o resfriamento da temperatura da superfície do mar nesta região. A oscilação entre estas duas situações é feita com uma periodicidade irregular, que nos últimos 40 anos, flutuou entre 3 e 7 anos [18].

Durante a fase La Niña da ENSO (El Niño – Oscilação Sul) existe um aumento da atividade convectiva ao norte da América Latina, cujos rios apresentam então vazões acima da média, enquanto que as bacias do sudeste do continente passam por um período mais seco. Ao contrário, na fase El Niño, movimentos de ar ascendente sobre o norte do continente reduzem as chuvas nesta região. As altas pressões atmosféricas que se instalam então na Amazônia bloqueiam a propagação das frentes polares vindas do sul que tendem a estacionarem sobre as bacias do sul do continente provocando chuvas intensas e prolongadas.

O monitoramento das condições da oscilação ENSO pode ser feito através de medidas no Pacífico de temperatura da superfície do mar, de velocidade do vento à superfície, ou de nível médio do mar; ou ainda, através das diferenças de pressão entre a ilha de Tahiti (Polinésia Francesa) e a localidade de Darwin (Austrália), conhecido como índice ISO (Índice de Oscilação Sul, SOI). Estas medições são em geral, utilizadas para identificação das fases da ENSO em sua forma padronizada ou através de suas anomalias (ver [8], para cálculo das anomalias).

A introdução da consideração das fases da ENSO na geração de séries sintéticas de afluições diárias, através do modelo DIANA, consiste em gerar séries sintéticas de afluições diárias condicionadas a ocorrência de cada uma das fases da ENSO (El Niño, La Niña e Normal). Este condicionamento é obtido utilizando-se apenas os anos (estações chuvosas) da série histórica correspondentes à uma específica fase da ENSO na estimação dos parâmetros do modelo estocástico de séries sintéticas de afluições diárias. Para tal, tornou-se necessário associar cada ano (estação chuvosa) do histórico de afluições à uma das fase da ENSO.

No estudo desenvolvido pelo CEPEL [8], para a bacia do rio Paraná, foram testadas várias combinações de limites para os valores do índice SOI em conjunto com índices de intensidade de cheias e índices de ocorrência de cheias, na busca de um critério que associasse o comportamento do índice SOI, com o regime de cheias nesta bacia. Neste estudo verificou-se na bacia do rio Paraná: tendência de uma maior frequência de cheias durante estações chuvosas (novembro-abril), quando em algum semestre entre maio e dezembro em pelo menos 3 meses o índice SOI padronizado superar/não superar 1 e em um quarto mês o índice SOI padronizado superar 0.6, caracterizando-se assim, "estações chuvosas mais molhadas". Por outro lado, quando em algum semestre entre maio e dezembro em pelo menos 3 meses o índice SOI padronizado superar/não superar -1 e em um quarto mês o índice SOI padronizado superar -0.6, identificou-se uma menor frequência de cheias durante a estação chuvosa da bacia, "estações chuvosas mais secas". Definiu-se, então, que para as estações chuvosas identificadas como "mais molhadas", a estimação dos parâmetros do modelo de geração de

Relatório Técnico – 1319/2019_a

séries sintéticas deveria desconsiderar os registros históricos das estações "mais secas". Já para as estações chuvosas identificadas como "mais secas", a estimação dos parâmetros do modelo de geração de séries sintéticas deveria desconsiderar os registros históricos das estações "mais molhadas". Para as estações chuvosas que não fossem identificadas como "mais chuvosas", nem "mais secas", deveriam ser considerados apenas os registros históricos que não pertencessem a nenhum dos dois conjuntos, denominados "estações chuvosas normais".

Este critério foi aplicado para o cálculo dos volumes de espera da estação chuvosa 1997/98 para a bacia do rio Paraná, e incorporado no sistema SPEC através da implementação da função ENSOCLAS no módulo DIANA.

De forma a facilitar os estudos para avaliar a influência das fases da ENSO na frequência de ocorrência de cheias em outras bacias do SIN, a função ENSOCLAS foi desenvolvida de forma a permitir a análise/consideração de diferentes séries de índices das medições no Pacífico, associados ao fenômeno ENSO, ou outros índices que se julgar pertinente assim como, diferentes critérios para identificação de estações "mais molhada", "mais secas" e "normais", através da relação entre índices de intensidade de cheias e composição de valores dos índices.

Definido um critério e um índice, a função ENSOCLAS classifica as estações chuvosas do registro histórico de aflúências diárias em "mais molhadas", "mais secas" e "normais". Tornando possível, então, ajustar o modelo DIANA considerando-se apenas as estações chuvosas do histórico de aflúências excluindo-se uma das duas classificações extremas, oposta aquela prevista de ocorrer durante a próxima estação chuvosa. Por exemplo, se a previsão é de que a próxima estação chuvosa seja classificada como "mais molhada" então, excluem-se, do conjunto de seqüências históricas de aflúências diárias a ser utilizado no ajuste do Modelo DIANA, as seqüências históricas de aflúências classificadas como "mais secas".

Com a função ENSOCLAS é possível criar critérios mais sofisticados nos quais existam duas opções para classificar o ano como "mais molhado" ou "mais seco". Por exemplo, opção 1 o ano ter três meses com valores maiores ou iguais a 1.0 e um mês com valor maior ou igual a 0,6 e, opção 2, quatro meses com valores maiores ou iguais a 1.0. Se num conjunto de seis meses iniciando em maio e terminando em dezembro a opção 1 ou 2 for atendida, a estação chuvosa é considerada "mais seca".

A partir da versão 4.2, a função ENSOCLAS passou a permitir utilizar indicadores associados a outros fenômenos macroclimáticos combinados ou não com os índices associados ao fenômeno ENSO, permitindo maior liberdade em relação a versão anterior. Além disso, a nomenclatura das classes

Relatório Técnico – 1319/2019_a

(inicialmente chamada de ENSO) foi alterada, de maneira que o nome das novas classes possam se definidos para cada estudo.

A função ENSOCLAS deve ser a primeira a ser executada no módulo DIANA quando se deseja gerar séries sintéticas de vazões incrementais (ou totais) diárias considerando informações macroclimáticas. Caso se deseje fazer a geração baseada em todas as estações chuvosas do histórico, não se deve utilizar esta função do módulo DIANA.

4. MÓDULO SIMRESC: SIMULAÇÃO DE APROVEITAMENTOS SEM CONTROLE DE DEFLUÊNCIAS

A metodologia para cálculo de volumes de espera, implementada no sistema SPEC e descrita nos itens 5 e 6 a seguir, pressupõe que os reservatórios da bacia possuem mecanismos de controle de suas defluências. Nas bacias em que existem reservatórios sem controle de defluências, e estes se localizam a montante do sistema de controle de cheias integrado, antes do cálculo dos volumes de espera pelo módulo CAEV é necessário obter a série de vazões resultantes da simulação da operação destes reservatórios considerando como afluência as séries sintéticas geradas pelo modelo DIANA. Assim, no cálculo dos volumes de espera dos sistemas parciais, pelo módulo CAEV, considera-se como afluência aos reservatórios imediatamente a jusante dos reservatórios sem controle de defluências a soma da vazão incremental com a defluência obtida na simulação da operação destes últimos. O módulo SIMRESC foi desenvolvido para atender a esta necessidade.

Um exemplo no SIN de sistema de controle de cheias com estas características é a bacia do rio Paraíba do Sul, [19] onde o reservatório da usina hidroelétrica Jaguari tem um vertedor em lâmina livre e o reservatório da usina hidroelétrica Paraibuna que tem vertedor Tulipa. Estes reservatórios para o sistema de controle de cheias e geração de energia elétrica são os mais a montante da bacia.

Na Figura 2.1, onde é apresentado o fluxograma de encadeamento dos módulos do sistema SPEC, o retângulo tracejado engloba a etapa correspondente ao módulo SIMRESC, que só é utilizado para o caso de bacias com reservatórios sem controle de defluências. A seguir são detalhadas as etapas para o cálculo de volumes de espera em bacias com estas características. Para facilitar a descrição destas etapas, é apresentado, na Figura 4.1, um exemplo de topologia de uma bacia fictícia formada por quatro reservatórios e dois pontos de controle de cheias, sendo que os dois reservatórios de montante (UHE1 e UHE2) não possuem controle de defluência. Os volumes de espera a serem alocados nos reservatórios UHE3 e UHE4 são calculados de acordo com os seguintes passos:

1. **Módulo DIANA:** geração de séries sintéticas de afluências diárias incrementais as quatro UHEs da bacia (A_i , $i=1, \dots, 4$);
2. **Módulo SIMRESC:** simulação da operação das usinas sem controle de defluências, localizadas nas cabeceiras, UHE1 e UHE2, considerando-se como afluências as séries sintéticas (passo i). O resultado das simulações são as defluências totais (turbinadas + vertidas), D_i , $i=1, 2$. As

afluências ao reservatório UH3 são obtidas pela soma das vazões incrementais sintéticas, A3, (obtida no passo i), com as defluências do reservatório de montante (D1), resultante da simulação da operação das séries sintéticas afluentes a UH1. Para a UHE4 as vazões afluentes são o resultado da soma das incrementais A4 (obtida no passo i), com as defluências de UHE 2 (D2), resultante da simulação;

3. **Módulo CAEV:** Cálculo dos volumes de espera dos sistemas parciais do sistema de controle de cheias formado apenas pelos reservatórios UH3 e UH4;
4. **Módulo VESPOT:** Desagregação dos volumes de espera dos sistemas parciais em volumes de espera pelos reservatórios UH3 e UH4.

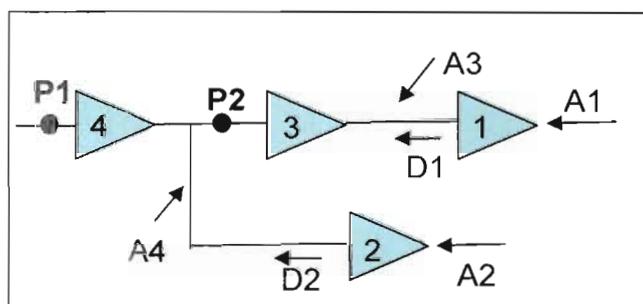


Figura 4.1 – Topologia de bacia onde os dois reservatórios de montante 1 e 2 não possuem controle de defluência.

No módulo SIMRESC, para uma bacia com a topologia apresentada na Figura 4.1, as operações dos reservatórios UH1 e UH2 são feitas de forma independente. A regra de operação para o reservatório a ser simulado i para cada dia t é apresentada no fluxograma da Figura 4.2 e detalhada em seguida.

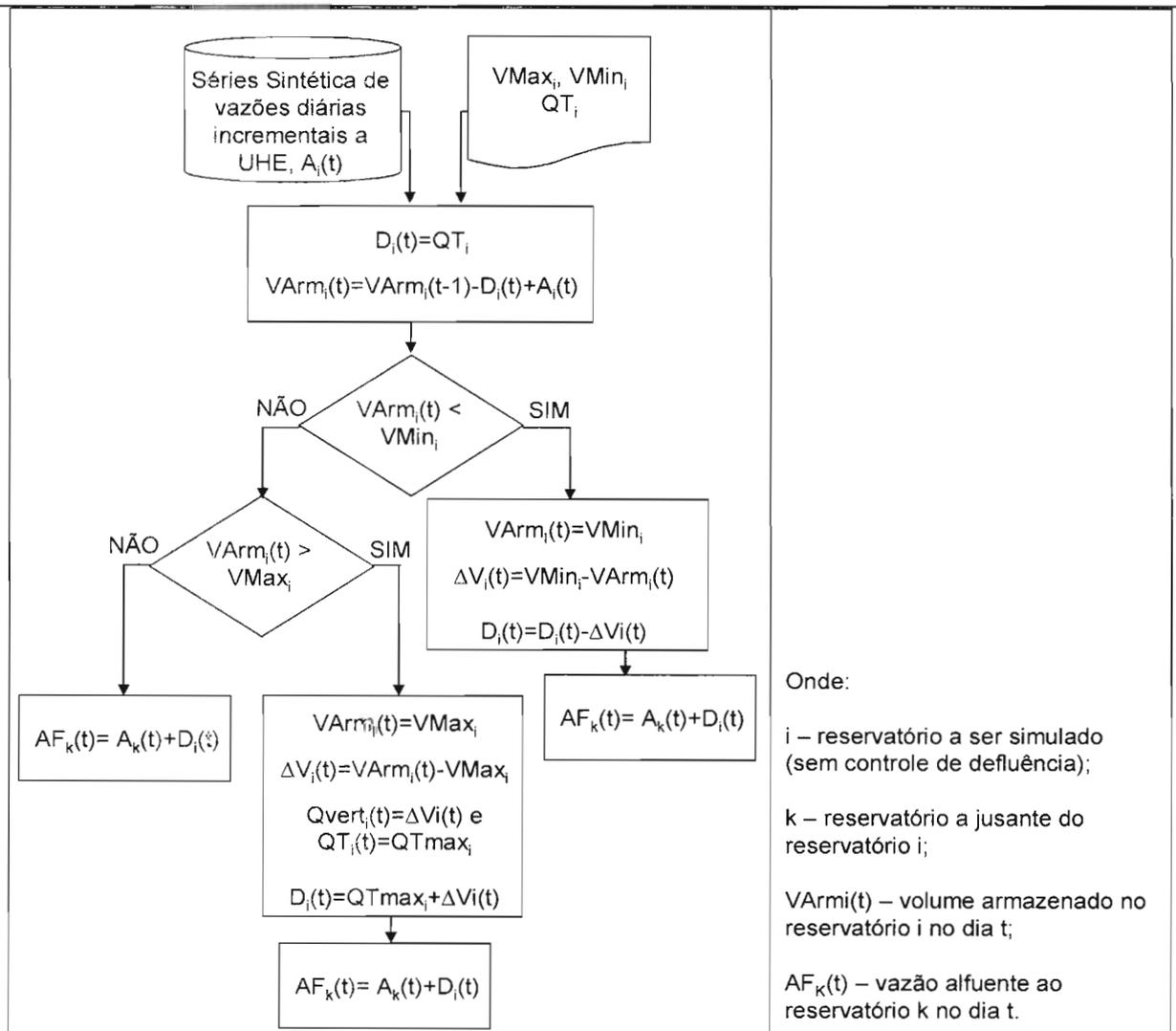


Figura 4.2 – Fluxograma simplificado da rotina de simulação da operação dos reservatórios sem controle de defluências.

1. Calcular o balanço hídrico do reservatório i considerando a afluência oriunda da série sintética e supondo como defluência ($D_i(t)$) uma vazão turbinada fornecida pelo usuário ($QT_i(t)$);
2. Caso o nível de armazenamento resultante do reservatório i seja inferior ao seu nível mínimo ($VMin_i$), calcular o volume necessário para que o reservatório atinja o seu nível mínimo ($\Delta V_i(t)$), atualizar a vazão turbinada descontando-se este volume, $QT_i(t) = QT_i(t) - \Delta V_i(t)$, e fazer a defluência ($D_i(t)$) igual ao novo valor de $QT_i(t)$;

-
3. Caso o nível de armazenamento seja superior ao nível máximo (V_{Maxi}), fazer a UHE turbinar sua vazão máxima turbinável (Q_{Tmaxi}), e calcular a vazão a ser vertida necessária para que o reservatório atinja seu nível máximo. A vazão vertida ($Q_{verti}(t)$) é calculada através do método de Puls [20]. A defluência será $D_i(t) = Q_{verti}(t) + Q_{Tmaxi}$;
 4. As vazões afluentes aos reservatórios de jusante serão obtidas pela soma da defluência resultante da simulação da operação do reservatório imediatamente a montante com a afluência incremental. No exemplo da Figura 2, no dia t a afluência a UHE 3 seria obtida pela soma da defluência da UHE 1 ($D_1(t)$), com a afluência incremental a UHE 3 ($A_3(t)$), e a vazão afluente a UHE 4 seria obtida pela soma das defluências das UHEs 2 ($D_2(t)$) e 3 ($D_3(t)$), com a afluência incremental $A_4(t)$.

5. MÓDULO CAEV: CÁLCULO DOS VOLUMES DE ESPERA POR SISTEMAS PARCIAIS

O controle de cheias numa bacia com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle de cheias (local onde existe uma vazão de restrição, além da qual ocorrem prejuízos por transbordamento) é realizado deixando-se espaços vazios (também denominados volumes de espera) nos reservatórios, variáveis sazonalmente, capazes de acomodar temporariamente as afluições elevadas que ultrapassem as vazões de restrição nos pontos de controle. O cálculo do espaço vazio a ser alocado em cada reservatório e em cada intervalo de tempo é um problema complexo tanto do ponto de vista temporal, como espacial, devido a interdependência entre os reservatórios.

Por exemplo, no sistema de reservatórios da Figura 5.1, formado por dois reservatórios R1 e R2 e dois pontos de controle de cheias P1 e P2, existe um mínimo espaço vazio a ser alocado no reservatório R2, que é função exclusivamente da vazão de restrição em P2 e das afluições do rio A. Por outro lado, o mínimo espaço vazio a ser alocado no reservatório R1 depende das afluições dos rios A e B e também do espaço vazio que tiver sido alocado no reservatório R2.

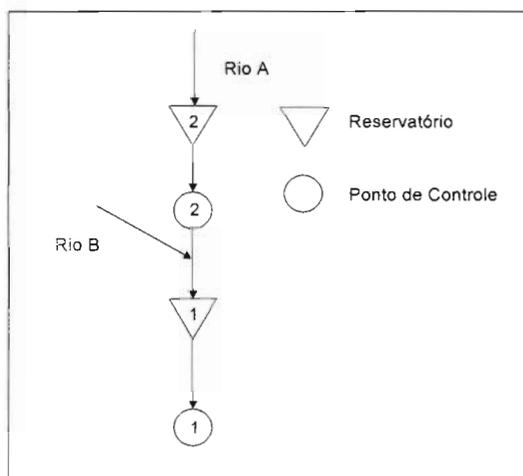


Figura 5.1- Topologia de um sistema com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle de cheias.

Além disto, as afluições aos reservatórios R1 e R2 são em geral desconhecidas, o que torna o problema essencialmente estocástico. Este problema se torna mais simples quando o sistema possui apenas um reservatório e um ponto de controle de cheias e as afluições são conhecidas, como apresentado no item 5.1 a seguir.

5.1. SISTEMA COM 1 RESERVATÓRIO E 1 PONTO DE CONTROLE DE CHEIAS

5.1.1. Abordagem determinística

Seja o sistema formado por apenas um reservatório e um ponto de controle de cheias da Figura 5.2 a seguir:

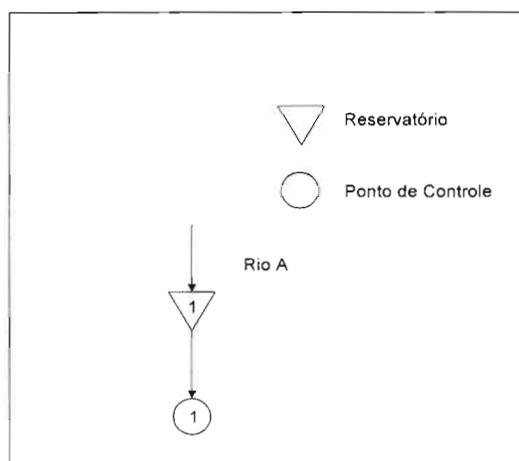


Figura 5.2 - Topologia de um sistema com um reservatório e um ponto de controle de cheias

Se as afluências são conhecidas, então o problema de calcular os volumes de espera a serem alocados no reservatório R1 nos intervalos de tempo $t=1, \dots, T$, de forma a evitar-se inundações no ponto de controle P1, pode ser resolvido utilizando-se o método das Trajetórias Críticas [21] de forma determinística.

Seja $\{q(1), q(2), \dots, q(T)\}$ uma sequência de afluências ao reservatório R1 conhecida e m a vazão máxima que não causa inundação no ponto de controle P1 a jusante de R1, então os volumes de espera $\{VE(t), t=1, \dots, T\}$ necessários a cada intervalo de tempo t , no reservatório R1 para que não ocorram inundações no ponto de controle P1, dada a sequência $\{q(1), q(2), \dots, q(T)\}$, podem ser obtidos através da recursão:

$$VE(T) = 0 \quad (5.1)$$

$$VE(t-1) = (q(t) - m) + VE(t) \quad t = T, \dots, 1 \quad (5.2)$$

O conjunto de volumes de espera $VE(t)$, $t = 1, \dots, T$ é denominado Trajetória Crítica associada à sequência de afluências $\{q(1), q(2), \dots, q(T)\}$ e a defluência máxima m .

5.1.2. Abordagem estocástica

Entretanto, em geral não se conhece a sequência de afluições a um reservatório e, portanto, a definição dos volumes de espera necessários para proteger um ponto de controle a jusante de um reservatório é um problema estocástico, cuja estocasticidade das afluições pode ser tratada através da consideração de um conjunto de possíveis sequências de afluições obtidas através de um modelo estocástico de geração de séries sintéticas de afluições. No sistema SPEC o modelo estocástico afluições diárias adotado é o DIANA, descrito no item 3.

Neste caso deve-se adotar uma abordagem estocástica do Método das Trajetórias Críticas, na qual considera-se um conjunto de K sequências sintéticas de afluições, produzidas por um modelo estocástico. Para cada uma das K sequências $\{q(t,k), t=1, \dots, T\}$, $k=1, \dots, K$, calcula-se as Trajetórias Críticas correspondentes através da recorrência (5.2), obtendo-se $\{VE(t,k), t=1, \dots, T\}$, $k=1, \dots, K$. Os volumes de espera necessários a cada intervalo de tempo t , para que não ocorram danos no ponto de controle P1 são dados pela envoltória das K trajetórias críticas, $\{E(1), E(2), \dots, E(T)\}$, a qual é calculada por:

$$E(t) = \text{Max} \{VE(t,k), k=1, \dots, K\}, \quad t=1, \dots, T \quad (5.3)$$

Como a contribuição dada pelo Setor Elétrico para o controle de cheias é conjuntural, ou seja, não se pretende obter uma proteção contra cheias de 100% nos vales a jusante dos reservatórios do Setor Elétrico com a alocação de volumes de espera. Nos Estudos de Prevenção de Cheias o grau de proteção contra cheias (tempo de retorno) é proporcional ao número de séries a serem protegidas, e é dado por:

$$K' = K - (K / TR) \quad (5.4)$$

onde: K é o número de séries sintéticas de afluições ao reservatório;

TR é o tempo de retorno em anos associado ao risco de cheias p ;

$p = 1/TR$; e

K' é o número de séries sintéticas a serem protegidas.

5.1.2.1. Critério para escolha de séries a serem protegidas

A escolha de quais séries serão protegidas é feita de forma a otimizar uma função de interesse energético. No sistema SPEC são considerados dois critérios: minimização do maior valor de volume de espera e maximização da probabilidade de recuperação dos volumes de espera.

O critério associado à minimização do maior valor de volume de espera (também chamado de flecha

máxima) [22] descarta as séries cujas trajetórias críticas apresentam volumes de espera maiores. A variável que irá definir o descarte é o máximo volume de espera da trajetória crítica de uma determinada série, de acordo com a expressão (5.5). As séries que não serão protegidas serão aquelas que tiverem o maior valor para o volume de espera máximo.

$$VE_{MÁX}(c) = \text{máx} [VE(t,c); t = 1, \dots, T] \quad (5.5)$$

Onde: $VE_{MÁX}(c)$ é o volume de espera máximo da c-ésima série.

O critério associado à maximização da probabilidade de recuperação dos volumes de espera (também chamado de máximo reenchimento) [23] descarta as séries que requerem vazões afluentes maiores principalmente aquelas que ocorrem no final da estação chuvosa, para garantir que o reservatório chegue ao final da estação chuvosa cheio. A variável que irá definir qual série será descartada é a máxima tangente, de acordo com a expressão (5.6). As séries a serem descartadas serão aquelas que apresentarem os maiores valores para a tangente máxima.

$$TAN_{MÁX}(c) = \text{máx} \left[\frac{VE(t,c)}{\Delta t}; t = 1, \dots, T \right] \quad (5.6)$$

$$\text{Sendo: } \Delta t = (T + 1) - t \quad (5.7)$$

Onde: $TAN_{MÁX}(c)$ é a tangente máxima da c-ésima série.

Estudos de simulação executados em [23], indicaram o segundo critério como o mais adequado para bacias onde existe uma estação seca, sendo desejável iniciá-la com os reservatórios cheios, ficando o primeiro critério para ser usado onde há necessidade de alocação de volume de espera durante todo o ano.

5.2. SISTEMA COM N RESERVATÓRIO E M PONTO DE CONTROLE DE CHEIAS

O método das Trajetórias Críticas resolve a questão da alocação temporal dos volumes de espera e, portanto, é adequado para sistemas com apenas um reservatório. Para um sistema com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle de cheias é necessário ainda, a determinação de como este volume deve ser distribuído espacialmente.

Os problemas de sistemas multireservatórios para controle de cheias foram analisados teoricamente pela primeira vez por Marien [24], levando a formulação da Teoria das Condições de Controlabilidade

para a análise determinística de sistemas com múltiplos reservatórios com apenas um ponto de controle de cheias. Damázio [25], estendeu estes resultados de forma a considerar também sistemas com múltiplos pontos de controle de cheias, agregando ainda à esta teoria uma abordagem estocástica através da utilização de séries sintéticas e da noção de envoltórias [8][9].

Seja a hipotética bacia hidrográfica descrita na Figura 5.1, caracterizada por 2 reservatórios, R1 e R2, e 2 pontos de controle P1 e P2. Para o desenvolvimento das condições de controlabilidade é necessária a definição de sistema parcial [24]. Define-se como sistema parcial todo conjunto de reservatórios que tenha apenas um exutório e este seja um ponto de controle. Assim, o sistema da figura 5.1 possui três sistemas parciais: $S_1=\{R1\}$, $S_2=\{R2\}$ e $S_{1,2}=\{R1, R2\}$.

Para um sistema formado três reservatórios e três pontos de controle como o apresentado na Figura 5.3 os sistemas parciais são: $S_1=\{1\}$, $S_{1,2}=\{1,2\}$, $S_{1,3}=\{1,3\}$, $S_{1,2,3}=\{1,2,3\}$, $S_2=\{2\}$, $S_3=\{3\}$. Note que, o conjunto $\{2,3\}$ não é um sistema parcial. Mais ainda, se não houvesse o ponto de controle P3 no sistema da Figura 5.3, por exemplo, o conjunto $\{3\}$ também não seria um sistema parcial.

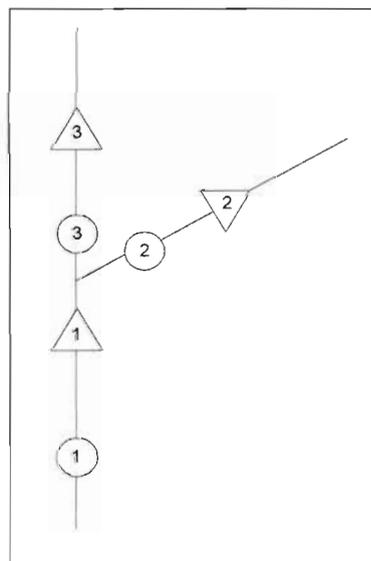


Figura 5.3 - Topologia de um sistema três reservatórios e três pontos de controle de cheias

Voltando ao sistema de reservatórios da Figura 5.1, para um intervalo de tempo qualquer t , o domínio das soluções possíveis para aquele sistema de reservatórios, é caracterizado pelas seguintes equações:

$$EV_1(t) \geq v_1(t) \tag{5.8}$$

$$EV_2(t) \geq v_2(t) \tag{5.9}$$

$$EV_1(t) + EV_2(t) \geq v_{1,2}(t) \tag{5.10}$$

Onde: $EV_1(t)$ é o espaço vazio no reservatório 1 no intervalo de tempo t ;
 $EV_2(t)$ é o espaço vazio no reservatório 2 no intervalo de tempo t ;
 $v_1(t)$ é o limite inferior para espaço vazio em R1 no intervalo t , que se deseja calcular;
 $v_2(t)$ é o limite inferior para espaço vazio em R2 no intervalo t , que se deseja calcular; e
 $v_{1,2}(t)$ é o limite inferior para a soma dos espaços vazios em R1 e R2 no intervalo t .

Os $v(t)$ podem ser considerados com as envoltórias $EV(t)$ definidas para o caso de um reservatório e afluências desconhecidas do item 5.1.1 (maiores detalhes do cálculo de $v(t)$ podem ser obtidos em [9][10][25].

Este conjunto de equações definem o domínio das soluções e são denominados Condições de Controlabilidade.

O módulo CAEV calcula os valores de $v(t)$ que servem para definir a região viável para os espaços vazios. A Figura 5.4 mostra esta região para o sistema da Figura 5.1.

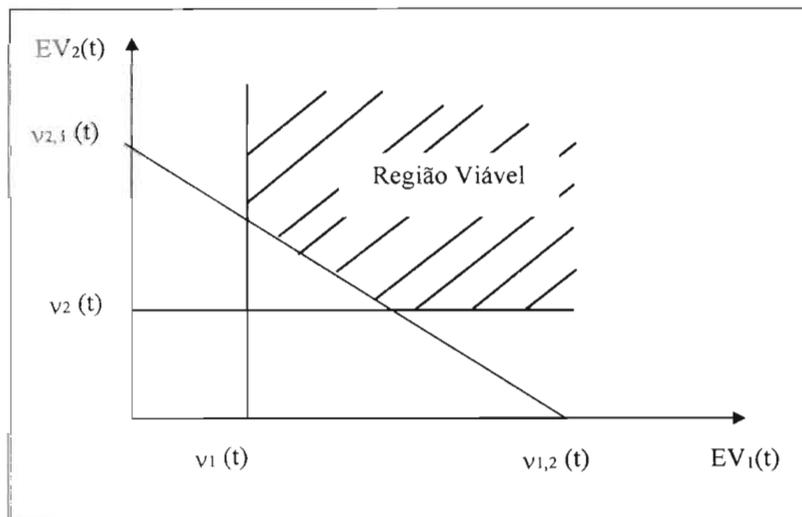


Figura 5.4 – Região viável para a solução do problema de alocação de volumes de espera para o sistema de controle de cheias apresentado na figura 5.1

A área hachurada da Figura 5.4 define a região viável para os espaços vazios. A operação real dos reservatórios deverá ser feita procurando-se manter permanentemente os espaços vazios dentro da região viável (hachurada), sempre que não estiver ocorrendo cheia. A região viável será sempre caracterizada por limites inferiores ($v(t)$) para somas de espaços vazios de reservatórios pertencentes a sistemas parciais.

Relatório Técnico – 1319/2019_a

Já para o sistema de reservatórios da Figura 5.3 (com 3 reservatórios e 3 pontos de controle), a região viável é definida por:

$$EV_1(t) \geq v_1(t) \quad (5.11)$$

$$EV_2(t) \geq v_2(t) \quad (5.12)$$

$$EV_3(t) \geq v_3(t) \quad (5.13)$$

$$EV_1(t) + EV_2(t) \geq v_{1,2}(t) \quad (5.14)$$

$$EV_1(t) + EV_3(t) \geq v_{1,3}(t) \quad (5.15)$$

$$EV_1(t) + EV_2(t) + EV_3(t) \geq v_{1,2,3}(t) \quad (5.16)$$

Assim, utilizando-se a Teoria das Condições de Controlabilidade, é possível definir o espaço das soluções viáveis dos volumes de espera. Em outras palavras, obtém-se os volumes de espera para os sistemas parciais de um sistema de reservatórios, ficando faltando apenas a definição da distribuição destes volumes pelos reservatórios do sistema.

6. MÓDULO VESpot: DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DOS VOLUMES DE ESPERA PELOS RESERVATÓRIOS

Para a distribuição dos volumes das envoltórias dos sistemas parciais de um sistema com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle de cheias pelos reservatórios do sistema, resolve-se um problema linear estocástico com uma função objetivo que reflita os interesses da geração de energia elétrica. Como técnica de solução faz-se uso da decomposição de Benders [26] e algoritmos de fluxo em redes, utilizando-se as envoltórias dos sistemas parciais como restrições do problema para acelerar a convergência do método.

No sistema SPEC foram implementadas três alternativas de função objetivo:

- i. alocação proporcional,
- ii. alocação por faixas e prioridades, e
- iii. alocação considerando o potencial de exposição à cheias.

Na alocação proporcional, procura-se evitar alocações desequilibradas de espaços vazios nos reservatórios, onde deplecionamentos exagerados de alguns reservatórios comprometam a capacidade de geração do sistema. Considerando-se os percentuais de volume útil correspondentes aos volumes de espera, minimiza-se, a cada intervalo de tempo, a diferença entre seus valores máximos e mínimos ao longo do sistema.

Na alocação por faixas e prioridades, na função objetivo atribui-se prioridades de deplecionamento aos reservatórios e divide-se os seus volumes úteis em faixas. Utiliza-se, então, uma função objetivo onde as alocações de volume de espera nos reservatórios são penalizadas diferentemente conforme a faixa em que cada um se encontra e, no caso de mesma faixa, conforme as prioridades de deplecionamento. Deste modo pode-se, por exemplo, definir as faixas e prioridades de forma a privilegiar a alocação de volumes de espera a montante, maximizando, assim, a energia armazenada no sistema. Esta é uma boa alternativa para o início da estação chuvosa, mas para o final da estação chuvosa pode-se comprometer o reenchimento do sistema.

Na alocação considerando o potencial de exposição a cheias na função objetivo parte-se da regra empírica tradicionalmente usada para repartir os volumes de espera das envoltórias pelos reservatórios do sistema, considerando-se alocações proporcionais aos potenciais de exposição a cheias de cada um deles [11], e procuram-se soluções no seu entorno. Para tal, consideram-se

prioridades de deplecionamento de montante para jusante e apenas duas faixas por reservatório, tomando-se como limite inferior da primeira faixa a alocação empírica. Como, em geral, a regra empírica tende a ser conservadora o uso desta função objetivo tende a reduzir o total de volume de espera.

No Anexo B reproduz-se o relatório técnico CEPEL DPP/TEC –245/94: "*Minimização do Impacto Energético da Alocação de Volumes de Espera em Sistemas de Reservatórios*" [7], onde são apresentados maiores detalhes do método de desagregação espacial dos volumes de espera calculados para os sistemas parciais.

7. MÓDULO AUXARISCO

O programa AUXARISCO foi desenvolvido para evitar incoerências entre envoltórias de tempos de retorno diferentes geradas pelo CAEV, quando são impostas a este último modelo, restrições de volume de espera máximo para os aproveitamentos e/ou para os sistemas parciais que compõem a bacia em estudo.

O AUXARISCO examina as envoltórias por tempo de retorno em ordem crescente e vê se há incoerência em relação a tempos de retorno superiores, ou seja, tempos de retornos superiores têm que ter envoltórias maiores ou iguais às envoltórias calculadas para tempos de retornos inferiores. No caso de incoerência verificada, a envoltória do tempo de retorno superior adquire o valor da envoltória do tempo de retorno imediatamente inferior.

8. REFERÊNCIAS

- [1] RAUPP, I.P., COSTA, F.S. e DAMÁZIO, J.M., "SISTEMA SPEC – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias, Manual do Usuário – versão 1.2", Relatório Técnico CEPEL, Rio de Janeiro, 2013.
- [2] COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., ROCHA, V.F., GHIRARDI, A.O., "Planejamento da Operação para Controle de Cheias em Sistemas Hidroelétricos – Modelo SPEC", XV SNPTEE, Foz de Iguaçu, 1999
- [3] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, "Aspectos Metodológicos do modelo DIANA", Relatório Técnico CEPEL DPST-120/83, 1983.
- [4] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, "Diana versão 1.0 – Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias - Manual do Usuário", Relatório técnico CEPEL DPST-08099/99, 1999
- [5] KELMAN, J.; DAMÁZIO, J. M.; COSTA, J. P, Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias – Modelo DIANA, Revista Brasileira de Engenharia, Vol. 1, Nº. 2, pp. 5-22, 1983
- [6] COSTA, F.S, DAMÁZIO, J. M e KELMAN, J., "Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias – CAEV1, Relatório Técnico CEPEL DPST-272/90, CEPEL, Rio de Janeiro, 1990.
- [7] DAMÁZIO, J. M., COSTA, F.S e D'ANGELO A. G., "Minimização do Impacto Energético da Alocação de Volumes de Espera em Sistemas de Reservatórios", Relatório Técnico CEPEL DPP/TEC-245/94, CEPEL, Rio de Janeiro, 1994.
- [8] COSTA F.S., DAMÁZIO, J.M, GHIRARDI A.O., Incorporação de Tendências Macro-Climáticas na Operação de Controle de Cheias, XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, 1997.
- [9] DAMÁZIO, J. M.; MARIEN, J. L.; PEREIRA, M. V. F., KELMAN, J. e COSTA, F.S, "Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu Uso na Operação de Sistemas com Múltiplos Usos", Relatório Técnico CEPEL DPST-036/89, CEPEL, Rio de Janeiro, 1989.
- [10] DAMAZIO, J.M., MARIEN, J.L., COSTA, F.S., "Building Flood Control Rules Curves for Multipurpose Multi-reservoirs System Using Controllability Conditions". Water Resources Research, Vol. 30, Nº4, Pp. 1135-1144, 1994.

[11] GCOI/SCEN/GTHO, "Prevenção de Cheias nos Aproveitamentos Hidroelétricos dos Sistemas Interligados 1997/1998", Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

[12] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, "Operação Semanal de Controle de Cheias em Situação Normal – OPCHEN 3.1.4 - Manual de Metodologia", Relatório Técnico DP/DEA – 3051/08, 2010.

[13] COSTA, F.S., DAMAZIO, J.M., ROCHA, V.F., "Planejamento da Operação Semanal de Controle de Cheias em Sistemas Hidroelétricos – Modelos OPCHEN e OPCHENS", Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001.

[14] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, "Uso dos Programas OPCHEN e DIANA para Auxiliar a Tomada de Decisão de Relaxamento das Restrições de Volume de Espera", Relatório Técnico DP/DEA – 3933/11, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

[15] COSTA, F.S., RAUPP, I.P., DAMÁZIO, J.M., DE OLIVEIRA, P.D. e GUILHON, L.G.F., "Relaxamento de Restrições de Volumes de Espera na Operação de Controle de Cheias – Estudo de Caso Estação Chuvosa de 2006/2007 na Bacia do Rio Paraná", Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

[16] MATALAS, N.C., "Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology", Water Resources Research, Vol. 3, Nº. 4, pp. 973-945, 1967.

[17] FIERING, M.B., "Schemes for Handling Inconsistent Matrices", Water Resources Research, Vol. 4, Nº. 2, pp. 291-297, 1968.

[18] BOCANERA, J.E.M., CAIEDO, J.P.D., "Características Climáticas Relevantes Durante la Ocurrência de Fenomenos ENOS en el Nor-Occidente Sudamericano", Instituto Colombiano de Hidrologia, Metereologia y Adecuacion de Tierras (HIMAT), Santa Fé de Bogotá, D.C., 1992.

[19] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, "Plano Anual de Prevenção de Cheias (Ciclo 2012-2013)", Relatório Técnico, 2012.

[20] HENANDEZ, V., "Propagação de Enchentes em Reservatórios – Método Direto". Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, vol. 12, n.2, p.p. 115-122, 2007.

[21] KELMAN, J., "Stochastic Modeling on Hidrologic, Intermittent Daily Processes", Hydrology Papers, Fort Collins: Colorado State University, Nº. 89, feb.,1977.

[22] KELMAN, J., "Cheias e Aproveitamentos Hidroelétricos", Revista Brasileira de Engenharia, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1987.

[23] FRANÇA, E.H.F., CANELLA, S.D., "Análise Comparativa entre Possíveis Curvas de Alocação de Volumes de Espera", III Encontro Técnico de Hidrologia Operacional, Itaipava, RJ, 1994.

[24] MARIEN, J.L., "Controllability Conditions for Reservoir Flood Control Systems with Applications", Water Resources Research, 20 (1), pp. 1477-1488, 1984.

[25] DAMÁZIO, J.M., "Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu Uso na Operação de Sistemas com Múltiplos Usos", Tese de D.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.

[26] XAVIER, L.N., LIMA, A.L.D., COSTA, F.S. e MACEIRA, M.E.P., "Aprimoramento da Modelagem da Função de Produção Energética das Usinas Hidroelétricas no Modelo DECOMP e Resultados", XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Curitiba, Brasil, 2005.

ANEXO A. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS VOLUMES DE ESPERA

Este anexo reproduz parte do relatório técnico CEPEL DPP/TEC –245/94: “*Minimização do Impacto Energético da Alocação de Volumes de Espera em Sistemas de Reservatórios*”, que descreve a metodologia para a desagregação dos volumes de espera dos sistemas parciais, calculados pelo módulo CAEV, pelos reservatórios do sistema de controle de cheias. Esta metodologia está implementada no módulo VESPOOT do sistema SPEC.

A.1. INTRODUÇÃO

A incorporação do controle de cheias na operação dos reservatórios do sistema hidroelétrico brasileiro cria uma situação de conflito para o planejamento da operação já que para maximizar a geração de energia elétrica deve-se manter os reservatórios o mais cheios possível enquanto que, o controle de cheias requer exatamente o contrário. Em consequência, o planejamento da operação deve procurar minimizar este conflito evitando o desperdício através de uma coordenação cuidadosa da alocação de volumes de espera em cada reservatório do sistema. Esta alocação deve ser feita considerando a operação interligada do sistema sendo a otimalidade da solução proposta relacionada com uso energético da água armazenada.

Por exemplo, considerando-se o problema de alocação de volumes de espera num sistema multi-reservatórios para a proteção apenas da seção de jusante do sistema, uma das soluções é alocar volumes de espera somente no reservatório mais próximo do local a ser protegido. Outras soluções igualmente eficientes sob o ponto de vista do controle de cheias, consiste em reduzir a alocação de volumes de espera neste reservatório prevendo-se simultaneamente a alocação de volumes de espera nos reservatórios de montante. É de se esperar que as diferentes soluções tenham diferentes impactos na capacidade de geração de energia elétrica do sistema.

Damázio et al, 1989 apresenta uma formulação linear estocástica do problema de alocação ótima de volumes de espera propondo um esquema de solução por decomposição de Benders auxiliado pelo uso das chamadas condições de controlabilidade e por um algoritmo de cálculo de fluxo máximo em redes. Para exemplificar a aplicação do algoritmo considerou-se o caso do sistema de reservatórios da bacia dos rios Paranaíba e Grande, tendo sido utilizada com função objetivo a simples minimização do somatório dos volumes de espera alocados no sistema. Neste relatório, propõe-se o uso de duas novas funções objetivo mais relacionadas com os efeitos da alocação de volumes de espera na operação energética do sistema. Em seguida, a formulação apresentada em [9] é revista e, a seguir,

apresentada as duas novas funções objetivos propostas, discutindo as alterações de formulação necessárias para a sua aplicação.

A.2. FORMULAÇÃO LINEAR ESTOCÁSTICA DA ALOCAÇÃO DE VOLUMES DE ESPERA EM SISTEMAS MULTI-RESERVATÓRIOS

A alocação de volumes de espera em sistemas multi-reservatórios consiste na definição de um conjunto de curvas-guia superiores, uma para cada reservatório do sistema, que determinam para cada intervalo de tempo da estação chuvosa o volume vazio que precisa estar disponível em cada reservatório para o controle de cheias que eventualmente possam vir a ocorrer. Como uma proteção contra todas as cheias possíveis de ocorrer é impossível, o controle é sempre feito admitindo-se que no longo prazo em alguns anos não será possível controlar todas as afluições, sendo o inverso do percentual destes anos chamado de "tempo de retorno de controle" (TR). Numa formulação estocástica implícita a incerteza hidrológica é tratada considerando um conjunto Ω de seqüências igualmente possíveis de afluições para a estação chuvosa, cada seqüência dada por $Q^s = \{q_i^s(t), t = 2, \dots, D, i = 1, \dots, n\}$ onde D é a duração da estação chuvosa, n é o número de reservatórios no sistema e q_i^s é a afluição incremental ao reservatório i no instante t .

Seja N o número de seqüências em Ω . Para a definição de um controle de cheias com tempo de retorno TR, deve-se primeiro eliminar de Ω as k mais severas seqüências (ver [9] para uma discussão sobre critérios de severidade) onde $k=N/TR$, denotando-se por Ω_{TR} o conjunto das $N-k$ seqüências restantes em Ω .

Seja $E_j(t)$ o volume vazio correspondente à curva-guia superior da alocação de volumes de espera no reservatório j no início do intervalo de tempo t . Uma alocação $E = \{E_j(t); j = 1, \dots, n; t = 1, \dots, D\}$ é considerada viável sempre que sua implementação garantir o controle de todas as seqüências em Ω_{TR} (ou seja, sua durante a ocorrência de qualquer das seqüências em Ω^{TR} será sempre possível operar o sistema sem a necessidade de romper restrições de defluências máximas pré-especificadas).

Seja $w^s(E)$ uma função que forneça para qualquer alocação E o somatório em volume dos rompimentos de restrições de defluência máxima quando E é implementado e ocorre a seqüência. A implementação de E garante o controle da seqüência s quando $w^s(E) = 0$ e não garante quando $w^s(E) > 0$.

Damázio et al [9] propuseram, então, que o problema da alocação ótima de volume de espera fosse formulado como:

$$\min \sum \delta_{j,t} E_j(t) \tag{B.1}$$

sujeito a:

$$0 \leq E \leq K \tag{B.2}$$

$$w^s(E) \leq 0, \forall s \in \Omega_{TR} \tag{B.3}$$

onde $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ é o vetor das capacidades dos reservatórios do sistema.

Damázio et al [9] mostraram também como os valores de $w^s(E)$ e de suas derivadas parciais podem ser calculadas eficientemente para qualquer E a partir de uma modelagem da evolução dos armazenamentos e das defluências dos reservatórios do sistema como um fluxo em redes e propuseram, então, como algoritmo de solução de (B.1) a utilização da decomposição de Benders, baseado em aproximações sucessivas para as funções $w^s(E)$. A figura B1 apresenta uma representação esquemática do esquema proposto (para maiores detalhes do algoritmo de solução proposto inclusive de como utilizar as condições de controlabilidade para acelerar a convergência do método, ver [9]).

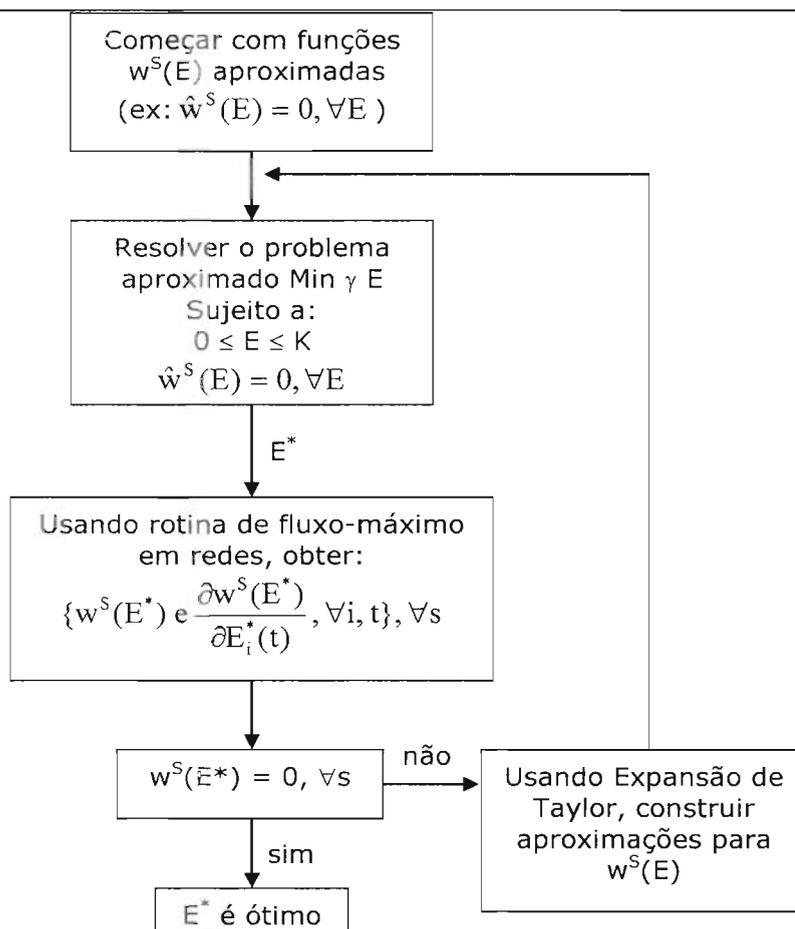


Figura B1: representação esquemática do esquema proposto.

A.2.1. Definição de funções-objetivo

A não ser em casos de regimes de cheias extremamente severos, apertados limites de defluência máxima e pouca capacidade de armazenamento disponível no sistema, em geral, existirá mais de uma alocação viável de volumes de espera, sendo desejável a implantação daquela alocação que minimize o impacto na capacidade de geração do sistema. Tradicionalmente, este impacto é avaliado em termos de parâmetros, tais como, o custo de operação ou o risco de déficit ao longo do horizonte do Plano de Operação dos sistemas interligados e, portanto, dever-se-ia procurar a alocação que minimize um desses parâmetros. Ocorre que, não existindo uma expressão analítica que forneça estes parâmetros para qualquer alocação de volumes de espera, a sua utilização diretamente como função objetivo exigiria o desenvolvimento de um algoritmo de otimização de procura por gradientes com

simulações para o cálculo do parâmetro energético escolhido e suas derivadas, de grande esforço computacional. Por outro lado, no desenvolvimento de uma formulação linear para a função objetivo, assim como a sugerida na equação (B.1), deve-se sempre considerar na definição dos coeficientes $\delta_{j,t}$ os efeitos nos parâmetros energéticos do sistema.

Na aplicação apresentada por Damázio et al [9] os coeficientes em (B.1) foram feitos todos iguais à unidade correspondendo à minimização do somatório dos volumes de espera alocados nos reservatórios do sistema. Com efeito, quanto menor for o total de volumes de espera alocado no sistema, menor será o impacto energético da alocação. Por outro lado, para um mesmo total de volume de espera alocado, diferentes distribuições pelos reservatórios do sistema deste total terão diferentes impactos energéticos. Como regra geral, deve-se evitar alocações desequilibradas, onde deplecionamentos exagerados de alguns reservatórios comprometam a capacidade de geração do sistema.

A.2.1.1. Alocação Proporcional

Uma maneira simplificada de se alcançar uma alocação equilibrada consiste em se considerar na modelagem a cada intervalo de tempo t o volume de espera relativo ($E_j(t)/K_j$) e minimizar a diferença entre seus valores máximos e mínimos. Para isto, adiciona-se ao problema as restrições.

$$\alpha(t) K_j \leq E_j \leq \gamma(t) K_j; j = 1, \dots, n; t = 1, \dots, D \quad (B.4)$$

$$0 \leq \alpha(t), \gamma(t) \leq 1, t = 1, \dots, D \quad (B.5)$$

e, usa-se como função objetivo a minimizar

$$F = \sum_t \sum_j E_j(t) + C \sum_t (\gamma(t) - \alpha(t)) \quad (B.6)$$

onde C deve ser tomado sempre menor que $\min_j \{K_j\}$ para garantir o predomínio do primeiro termo. O esquema de solução da figura (B.1) pode ser utilizado bastando considerar aproximado as restrições (B.4) e (B.5) e a função objetivo (B.6).

A.2.1.2. Alocação utilizando um Esquema de Faixas e Prioridades

Na operação puramente energética sempre que o simples turbinamento da afluência natural não é capaz de suprir a demanda, torna-se necessário o deplecionamento da água armazenada nos reservatórios do sistema. Estes deplecionamentos são então feitos seguindo um esquema de faixas e prioridades que tem como objetivo evitar o comprometimento da capacidade de geração do sistema futuro. Em termos operativos, a alocação de volumes de espera corresponde à implementação de deplecionamentos por todo o sistema, sendo natural que também seja adotado o esquema de faixas e

prioridades citado acima.

Seja π_j as prioridades para esvaziamento de cada reservatório j (ou seja, se $\pi_j < \pi_k$, o reservatório j deve ser esvaziado antes do esvaziamento do reservatório k) e seja $FX(j,h)$ o limite inferior, em volume armazenado da h -ésima faixa do reservatório j , $h = 1, \dots, H$, sendo H o número de faixas. Adiciona-se ao problema variáveis de folgas $\phi_j^h(t)$ para cada faixa h , no reservatório j e instante t utilizadas em restrições do tipo:

$$E_j(t) \leq K_j - FX(j,h) + \phi_j^h(t) \quad (B.7)$$

Que são adicionadas ao problema que passa a usar como função objetivo a minimizar:

$$F = \sum_t \sum_j \pi_j E_j(t) + \sum_{h=1}^H \sum_t \sum_j (\pi_j + h\pi^*) \phi_j^h(t) \quad (B.8)$$

Onde:

$$\pi^* = \max_j \{\pi_j\} \quad (B.9)$$