CONTROLE DE CHEIAS EM RESERVATÓRIOS DE
USINAS HIDRELÉTRICAS

JOARI PAULO DA COSTA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:

JERSON KELMAN
(Presidente)

PEDRO GUERRERO-SALAZAR

RUI CARLOS VIEIRA DA SILVA

LUIZ AUGUSTO LATTARI BARRETTO

RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 1982

COSTA, JOARI PAULO DA

Controle de Cheias em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas (Rio de Janeiro) 1982.

IX, 89p. 29,7cm (COPPE-UFRJ, Mc.Sc., Engenharia Civil , 1982)

Tese - Univ. Federal do Rio de Janeiro, Fac.de Engenharia

1. Assunto: Controle de Cheias I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jerson Kelman, orientador desta tese, pelas valiosas sugestões tanto na concepção das idéias quanto na redação do texto.

Ao Engenheiro Mário Veiga Ferraz Pereira pelas inúmeras contribuições feitas ao longo do trabalho e pela indispensável colaboração na elaboração do texto e revisão dos manuscritos.

Ao Engenheiro Jorge Machado Damazio que dispendeu muitas horas em proveitosas discussões nas quais surgiram muitas das idéias expostas neste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, CEFET-PR, em especial aos Professores Ivo Mezzadri e Aramis Demeterco, pela oportunidade proporcionada e pelo suporte financeiro durante o ano em que cursei na COPPE/UFRJ as disciplinas necessárias para obtenção dos créditos de mestrado.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, pela permissão, estímulo e suporte material necessários a realização deste trabalho.

Ao DEOP/ELETROBRÁS pelo auxílio prestado na obtenção de dados.

A Aimer Viana, por seu eficiente trabalho de datilografia.

Finalmente, um agradecimento especial a meus pais, Romeu e Elaine, pelo carinho com que sempre me acompanharam.

RESUMO

A operação de reservatórios projetados para fins conservativos é feita procurando-se manter o estoque de água tão elevado quanto possível. Este objetivo é conflitante com o controle de inundações que visa alocar uma parte do volume útil (volume de espera) para encaixar os volumes afluentes durante as cheias de período de retorno moderado (até 50 anos). O objetivo deste trabalho é calcular o máximo volume armazenável no reservatório sujeito a manter o risco de inundação à jusante (emergência) abaixo de um valor pré-determinado.

O cálculo do volume de espera é feito usualmente por simulação ou pelo método da curva volume-duração. Esta tese propõe o método dos volumes críticos que determina, para cada dia da estação chuvosa, o volume de espera necessário para manter a probabilidade de emergência igual a um valor pré-estabelecido (risco meta). Este método emprega um algoritmo recursivo sobre séries sintéticas de vazões. Apresenta-se um exemplo com o reservatório de Furnas, situado no rio Grande.

A alocação dos volumes de espera numa cascata de reservatórios pode ser feita de diversas maneiras, de modo que todos os reservatórios do sistema compartilhem a responsabilidade de proteger o vale contra inundações. Neste trabalho, propõe-se adotar a alocação que minimize a perda de capacidade de geração energética, garantindo-se que o risco de inundação seja inferior ao risco meta. A função objetivo selecionada é maximizar o valor esperado da energia armazenada no sistema hidrelétrico no início do período seco. Desenvolveu-se uma abordagem aproximada para definir a função objetivo a partir do método da curva volume-duração. Esta aproximação resulta num problema de otimização não linear com restrições lineares. Este método é aplicado ao sistema de reservatórios formado pelos rios Grande e Paranaíba e pelas usinas de Ilha Solteira e Jupiá.

ABSTRACT

Reservoirs operated for conservative purposes are usually kept at their highest possible levels. This conflicts with flood control requirements, which seek to empty a portion of the total volume (flood control storage) in order to be able to store the excess inflow during floods of return period up to 50 years. The objective of this work is to calculate the maximum storage allowed in the reservoir constrained by a predetermined risk of downstream flooding (emergency).

The flood control storage is usually calculated based on simulation or in the volume-duration method. This thesis proposes the critical volume method that determines, for each day of the rainy season, the flood control storage necessary to keep the emergency probability equal to a pre-established value (target risk). This method uses a backward recursion scheme over synthetic flow sequences. A case study with Furnas reservoir (Grande river) is presented.

The flood control storage volumes in a reservoir system can be allocated in many alternative ways, so that each reservoir shares the responsibility for valley protection. In this work, it is proposed the allocation that minimizes the loss of energy generation capability while keeping the flood risk below the target risk. The selected objective function is to maximize the expected value of the stored energy in the hydroelectric system at the beginning of the dry season. It is developed an approximate approach for defining the objective function through the volume-duration method. The approximation results in a non-linear optimization problem with linear constraints. This method is used in a case study with the reservoir system of the Grande and Paranaíba rivers and the power plants of Ilha Solteira and Jupiá.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 1

I.1 - Formulação do Problema 3

I.2 - Sumário do Conteúdo dos Capítulos 4

CAPÍTULO II - MÉTODOS USUAIS PARA DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE ESPERA EM UM ÚNICO RESERVATÓRIO . 7

II.1 - Método de Simulação 7

II.2 - Método da Curva Volume-Duração 8

II.2.1 - Aplicação 10

II.2.1.1 - Análise de Sensibilidade 13

II.2.1.2 - Risco Simulado 18

II.3 - Conclusões 19

CAPÍTULO III - O MÉTODO DOS VOLUMES CRÍTICOS 20

III.1 - Conceitos Básicos e Notação 20

III.2 - Algoritmo Básico 22

III.2.1 - Determinação do Volume de Espera para o dia t 23

III.2.2 - Determinação do Volume Crítico para o dia t 27

III.2.3 - Uso de Séries Sintéticas 31

III.3 - Aplicação 31

III.3.1 - Critério de Risco 32

III.3.1.1 Risco Meta Constante 32

III.3.1.2 Risco Meta Exponencial 33

III.3.1.3 Abatimento do Risco de Operação Energética 34

III.3.2 - Regra Energética 37

III.3.3 - Intervalo de Discretização 38

III.3.4 - Comprimento do Histórico de Vazões . 39

III.3.5 - Conclusões 40

CAPÍTULO IV - SISTEMA DE RESERVATÓRIOS INTERLIGADOS . 41

IV.1 - Colocação do Problema 41

IV.2 - Exemplo 42

IV.2.1 - Cálculo dos Volumes de Espera 43

IV.2.1.1 Método da Curva Volume-Duração 43

IV.2.1.2 Método dos Volumes Críticos 44

IV.3 - Alocação Ótima dos Volumes de Espera 46

IV.3.1 - Quantificação do Impacto Energético. 49

IV.3.2 - Minimização do Impacto Energético .. 50

IV.3.3 - Aplicação 51

IV.4 - Método Expedito 53

IV.4.1 - Obtenção das Curvas Volume-Duração Aproximadas 54

IV.4.1.1 Método 1 54

IV.4.1.2 Método 2 57

IV.4.1.3 Método 3 59

IV.4.1.4 Método 4 60

IV.4.2 - Otimização 64

IV.4.3 - Aplicação 67

IV.4.3.1 Curvas Volume-Duração 69

IV.4.3.2 Resultados Obtidos 73

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 78

V.1 - Conclusões 78

V.2 - Recomendações 82

APÊNDICE - ENERGIA ARMAZENADA 84

BIBLIOGRAFIA 87

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A maior parte dos reservatórios das usinas hidrelétricas que compõem o Parque Gerador Brasileiro foi projetada visando principalmente geração de energia. Em geral, as considerações com respeito às vazões de enchentes estiveram em pauta apenas durante o projeto dos órgãos de descarga. O dimensionamento destes órgãos visa garantir a segurança da barragem quando do advento da "cheia de projeto", escolhida em função da importância da obra que se quer proteger e, quase sempre, associada a um período de retorno muito elevado (superior a 1000 anos). O volume necessário para amortecer a cheia de projeto é alocado a partir do topo do volume útil, chamado nível máximo normal operativo, NMNO.

Ainda assim, a entrada em operação destas usinas visando o atendimento do mercado de energia (operação energética) causou a regularização das vazões, diminuindo a freqüência de pequenas inundações. Este fato, aliado à crescente demanda por terras, aumentou a ocupação dos vales à jusante das barragens. Conseqüentemente, as vazões máximas defluentes das usinas ficaram limitadas a valores tais que não ocorram danos no vale (vazão de restrição). Durante a ocorrência de vazões afluentes elevadas, a operação dos reservatórios passou a se orientar no sentido de, além de garantir a segurança da barragem, minimizar os prejuízos à jusante. Em geral, isto é feito alocando-se uma parte do volume útil, chamada volume de espera, destinada a encaixar temporariamente os volumes afluentes durante as cheias, a fim de que se possa manter a defluência do reservatório abaixo do limite máximo.

Um plano ideal de controle de cheias deveria preencher dois requisitos básicos:

a) Reduzir todas as cheias de forma tal que não ocorram danos à jusante

b) Coordenar a operação do sistema de reservatórios fazendo com que a maior parte das vazões afluentes seja arma

zenada de forma ótima para uso futuro.

Devido à natureza estocástica das vazões e ao tamanho limitado dos reservatórios é impossível obter tal plano, pois os volumes armazenados nos reservatórios ocasionalmente ultrapassam o nível máximo normal operativo. Neste momento a operação da usina passa a visar a segurança da barragem e as restrições com respeito a defluências que não inundam o vale a jusante são desativadas.

A probabilidade de ocorrência deste evento - aqui chamado emergência - pode ser usada para fornecer um plano probabilístico de controle de cheias. Este plano deve levar em conta os seguintes aspectos |1|:

- Determinação do risco

  A probabilidade de inundação deve ser mantida abaixo de um valor previamente selecionado. A avaliação desta probabilidade deve incorporar a política de operação dos reservatórios bem como a natureza estocástica das vazões afluentes (distribuição marginal de probabilidades, correlação espacial e temporal, sazonalidade), tempo de viagem entre a usina e o local a ser protegido, atenuação do pico da cheia devido à propagação no canal, contribuições da área não controlada pela usina, etc.

- Previsão de vazões

  O conhecimento da onda de cheia que está chegando ao reservatório permite antecipar a operação de emergência (efetuando-se defluências preventivas de vazões) ou evitar que se entre em operação de emergência mesmo quando o nível de água se encontra acima do NMNO |2|. Por outro lado, erros de previsão podem levar a decisões equivocadas (por exemplo, desencadeando desnecessariamente os procedimentos para segurança da barragem) e causar danos à jusante. Este problema se torna mais complexo quando uma parte considerável da vazão que chega ao local que se pretende proteger é devida à área de drenagem incremental, não controlada pelo reservatório. A elaboração de

um plano probabilístico de controle de cheias deve incorporar o desempenho do modelo de previsão que será adotado durante a operação em tempo real a fim de considerar os aspectos acima mencionados.

- Sistema de reservatórios

A seleção de quais reservatórios do sistema realizam o controle de cheias e a determinação do volume de espera a ser alocado em cada reservatório devem ser feitas considerando a operação interligada do sistema. A otimalidade da solução proposta está relacionada ao uso futuro da água armazenada.

I.1 Formulação do Problema

A incorporação do controle de cheias à operação dos reservatórios leva a considerar a questão como um problema de otimizar a operação de um reservatório de uso múltiplo.

A característica fundamental deste problema é serem os objetivos de controle de cheias e geração de energia elétrica conflitantes : para maximizar a geração de energia deve-se manter o reservatório o mais cheio possível enquanto que o controle de cheias requer exatamente o contrário, de forma a se dispor de volume suficiente para encaixar a descarga afluente. A dificuldade em encontrar uma escala comum para medir os efeitos de inundações e de deficit energético torna os objetivos incomensuráveis. Por um lado, a implantação de volume de espera faz com que o valor esperado do armazenamento no reservatório no início da estação seca diminua. Conseqüentemente, aumenta a expectativa de geração térmica de energia elétrica e, portanto, do custo de operação do sistema. Além disso, a longo prazo a diminuição de produção média de energia devido à utilização parcial dos reservatórios para controle de cheias está associada ao custo de antecipar a construção de novas usinas hidrelétricas para suprir essa diminuição. Por outro lado, os prejuízos causados por uma enchente podem tanto terem custos monetários associados (como danos à propriedades, lucros cessantes, desvios de tráfego, etc.) quanto custos não monetários (impacto social, problemas de saúde pública, etc.). A

implantação de um plano de controle de cheias, além de evitar ou reduzir os danos que ocorreriam à jusante permite um uso mais intensivo e diversificado da planície de inundação devido à redução do risco de cheia. A quantificação do acréscimo que pode ocorrer no valor da terra realça a complexidade em transformar em unidades monetárias os efeitos do controle de cheias.

Uma das maneiras de tratar problemas com múltiplos objetivos consiste em definir uma função utilidade que expressa as preferências do administrador do sistema com relação aos interesses distintos envolvidos. A construção desta função pode ser feita desde que os interesses envolvidos sejam independentes, isto é, ao se estabelecer a utilidade com relação a um deles o administrador não é influenciado pelos interesses remanescentes. A função utilidade é definida combinando-se de forma aditiva ou multiplicativa os múltiplos atributos envolvidos. Este enfoque consiste, portanto, em construir uma função univariada e maximizá-la |3|.

Um enfoque alternativo consiste em otimizar com relação a um único objetivo e considerar o outro como uma restri - ção. Wilkinson | 4 | formula o problema como maximização do controle de cheias sujeito a satisfazer uma confiabilidade pré-especificada de suprimento d'água. Isto é, procura encontrar os níveis mais baixos possíveis para o armazenamento nos reservatórios de forma a atender a probabilidade dada de ocorrência de secas. O volume livre remanescente no reservatório é então, utilizado para amortecimento de cheias. A formulação mais usual no Brasil, no entanto, é ter como função objetivo a utilização da água para fins energéticos e considerar o controle de cheias como uma restrição probabilística, fixando um período de retorno para a ocorrência de inundações no vale à jusante . Este é o ponto de vista do presente trabalho.

I.2 Sumário do Conteúdo dos Capítulos

No Capítulo seguinte apresenta-se os métodos usualmente empregados no Brasil para o cálculo do volume de espera em um único reservatório.

No Capítulo III, descreve-se uma metodologia que determina, para cada dia da estação chuvosa, o volume de espera necessário para manter o risco de emergência igual a um valor pré-estabelecido. Esta metodologia emprega um algoritmo recursivo sobre séries de vazões diárias históricas ou geradas por algum modelo. Para cada dia t o algoritmo considera uma política simplificada de operação durante o período (t+1,h) (onde h é o último dia da estação chuvosa) que incorpora tanto a operação energética quanto os volumes de espera já calculados. Esta política é usada para determinar o volume de espera que satisfaz o risco meta para o dia t. O volume de espera assim calculado é utilizado para estabelecer o conjunto de regras de operação simplificadas para o período (t,h) e assim sucessivamente |5|.

O Capítulo IV trata da alocação de volumes de espera ao longo de um sistema de reservatórios interligados. Existem diversas maneiras para distribuir os volumes de espera numa cascata de reservatórios de forma a garantir o mesmo risco de inundação : por exemplo, o reservatório de montante pode alocar um volume maior que o estritamente necessário para atender a sua vazão de restrição a fim de auxiliar o controle exercido pelo reservatório de jusante. Estas diferentes alocações modificam a distribuição no sistema dos volumes armazenados ao final do período chuvoso e, portanto, a perda energética associada. Este Capítulo propõe um método para otimizar a alocação dos volumes de espera, no sentido de minimizar a perda energética associada, reduzindo os riscos de inundação a um nível pré-fixado. Esta otimização é feita calculando-se um vetor de vazões de restrição fictícias que minimizam a perda energética.

O Capítulo V apresenta as conclusões deste trabalho bem como aponta alguns possíveis desdobramentos.

Cabe ressaltar que este trabalho propõe apenas medidas de carater operativo para o controle de cheias. Não são objeto desta pesquisa as medidas de carater estrutural que complementam a eficiência do controle proposto, tais como | 6 | :

1 - Construção de reservatórios para controle de cheias;

2 - Confinamento da vazão num canal pré-determinado através da construção de diques;

3 - Redução do nível máximo da cheia através da melhoria das condições de escoamento do canal do rio;

4 - Desvio das águas;

5 - Evacuação temporária da planície de inundação;

6 - Relocação de bens e propriedades;

7 - Delimitação da planície de inundação e

8 - Seguro contra inundações.

CAPÍTULO II

MÉTODOS USUAIS PARA DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE ESPERA EM UM ÚNICO RESERVATÓRIO

Este Capítulo apresenta os métodos usualmente empregados para o cálculo do volume de espera em um único reservatório.

II.1 Método de Simulação

O volume de espera a ser alocado em um reservatório depende do grau de proteção requerido. O procedimento usual consiste em definir uma "hidrógrafa de projeto" associada a um período de retorno pré-estabelecido (em geral entre 25 e 50 anos) e, uma vez fixado um conjunto de regras de operação para o reservatório, simular a evolução do seu armazenamento.

Quando a simulação é feita progressivamente (no sentido direto do tempo) a determinação do volume de espera necessário para amortecer a hidrógrafa de projeto é feita através de um processo de tentativa e erro. A solução deste problema pode ser facilitada pelo uso de programas de computador especialmente desenvolvidos para simular a operação hidrológica de um sistema de reservatórios, como, por exemplo, o HEC-5C |7|.

Quando a simulação é feita regressivamente, (no sentido inverso do tempo) o volume vazio a ser mantido no reservatório de forma que, ocorrendo a hidrógrafa de projeto a vazão defluente seja no máximo igual à vazão de restrição é obtido a partir de uma condição de fronteira que consiste, em geral, em considerar o reservatório cheio. Por exemplo, imaginando-se que a operação do reservatório consiste em defluir toda a vazão afluente desde que menor que a vazão de restrição, o volume de espera v_e é dado por:

$$v_e = \max_t \{ \min\{v_m;\ \max\{0;[v(t+1)-(q(t)-\bar{u})\Delta t]\}\}\} \qquad \text{(II.1)}$$

$$\text{para } t=h-1,\ldots 1$$

onde:

v_m é o volume correspondente a NMNO

v(t) é o volume armazenado no início do intervalo t

q(t) é a vazão afluente no intervalo t

$\bar{u}$ é a vazão da restrição

Δt é a duração do intervalo t

h é a duração da cheia de projeto ($v(h)=v_m$)

A principal dificuldade do método de simulação consiste em definir a "hidrógrafa de projeto de período de retorno dado" e, portanto, o risco real associado ao volume de espera determinado. Em vista disso, alguns autores (por exemplo Eichert, |8|) sugerem como critério a garantia de proteção total contra as cheias ocorridas no passado ao invés de uma restrição de risco.

II.2 Método da Curva Volume-Duração

Um enfoque que procura superar a dificuldade da definição da hidrógrafa de projeto associada a um período de retorno dado foi proposto por Beard |9|, para o caso de um único reservatório, fazendo uso da curva volume-duração. Esta técnica usa as distribuições de probabilidade do máximo volume afluente durante t dias, VA(t), para calcular a função va(t) que relaciona a duração ao volume (Figura II.1).

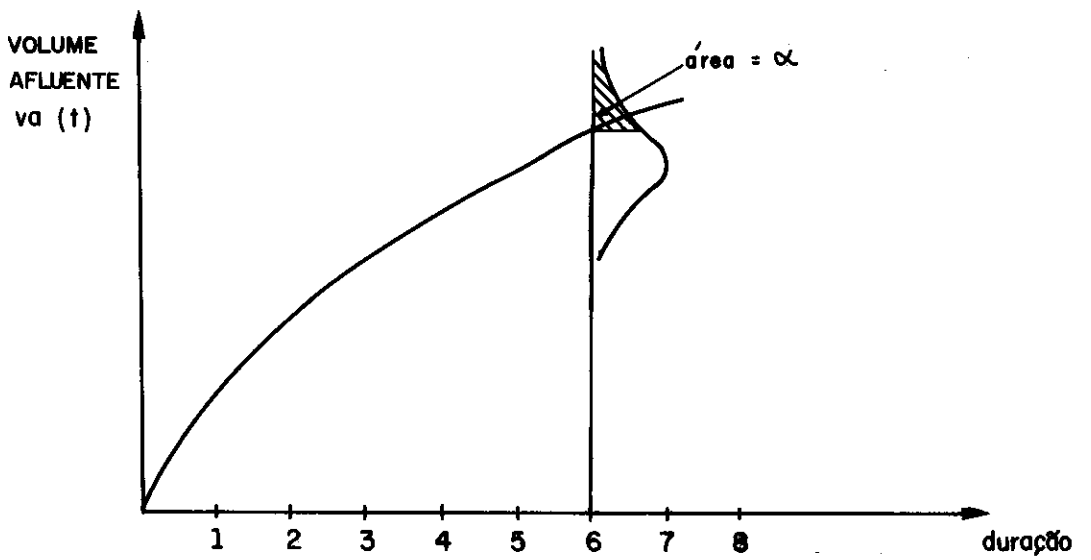


Figura II.1 - Curva volume - duração

A função va(t) é tal que

$$P[VA(t) > va(t)] = \alpha \qquad (II.2)$$

onde $1/\alpha$ é o período de recorrência desejado. A curva assim determinada equivale a uma hidrógrafa de projeto cujas vazões tem o mesmo período de retorno para cada duração t.

Define-se

$$z(t) = va(t) - t \cdot \bar{u} \qquad (II.3)$$

como o "volume de espera condicionado à duração t", sendo $\bar{u}$ a máxima vazão defluente do reservatório que não causa danos à jusante. O volume de espera recomendado pelo método é dado por

$$v_e = \max_t \{z(t)\} \qquad (II.4)$$

A duração associada ao volume v_e é chamada <u>duração crítica</u>, t*. Isto é, $v_e = z(t^*)$. A Figura II.2 ilustra o cálculo de v_e e t*.

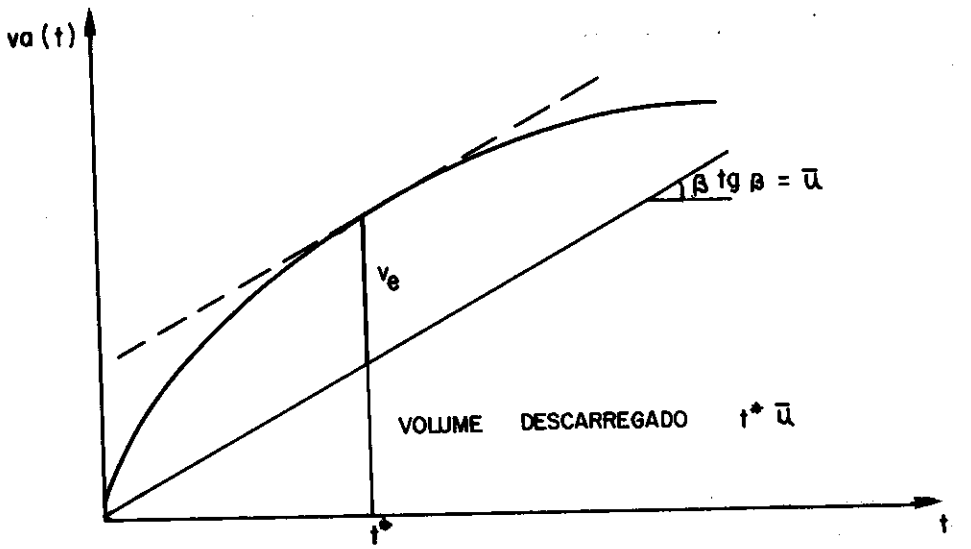


Figura II.2 - Cálculo do volume de espera v_e

Note-se que o máximo volume de espera é dado pelo ponto de tangência de uma reta paralela a $t\bar{u}$ com a curva volume - duração.

A regra de operação associada consiste em defluir $\bar{u}$ sempre que o volume livre no reservatório seja menor que o vo-

lume de espera recomendado, v_e. Não há qualquer restrição operativa para controle de cheias se o volume vazio for maior que v_e. Entretanto, o volume de espera fornecido por esta técnica não garante, para cheias de qualquer duração, o período de retorno se a defluência for igual a $\bar{u}$ sempre que o volume vazio for menor que v_e. De fato, a probabilidade de que v_e não seja suficiente é dada por

$$P[VA(1) > va(1) + \bar{u} \text{ ou } VA(2) > va(2) + 2\bar{u} \text{ ou } \ldots$$

$$VA(t^*) > va(t^*) + t^* \bar{u} \text{ ou } \ldots] \qquad \text{(II.5)}$$

que é maior do que ou igual ao risco meta α dado por

$$P[VA(t^*) > va(t^*) + t^* \bar{u}] \qquad \text{(II.6)}$$

A razão para esta diferença é que o verdadeiro período de retorno associado a um dado volume de espera depende da distribuição de probabilidade conjunta do vetor aleatório (VA(1), VA(2), VA(3),...) e a determinação da curva volume-duração requer apenas o conhecimento da distribuição marginal de cada VA(t).

II.2.1 Aplicação

O método da curva volume-duração foi usado para determinar o volume de espera para o reservatório de Furnas, situado no alto Rio Grande (ver Figura II.3), com área de drenagem de 50464 Km^2. O volume útil do reservatório é 17,217 Km^3 e vazões superiores a 4000 m^3/s causam danos no vale à jusante |10|.

A determinação da curva volume-duração é feita segundo |11| do seguinte modo:

Para cada duração

i) A partir do registro histórico de vazões diárias disponíveis, calcula-se a máxima vazão média afluente em cada ano;

ii) Ajusta-se uma distribuição de probabilidades log-Pearson tipo III à amostra obtida em (i);

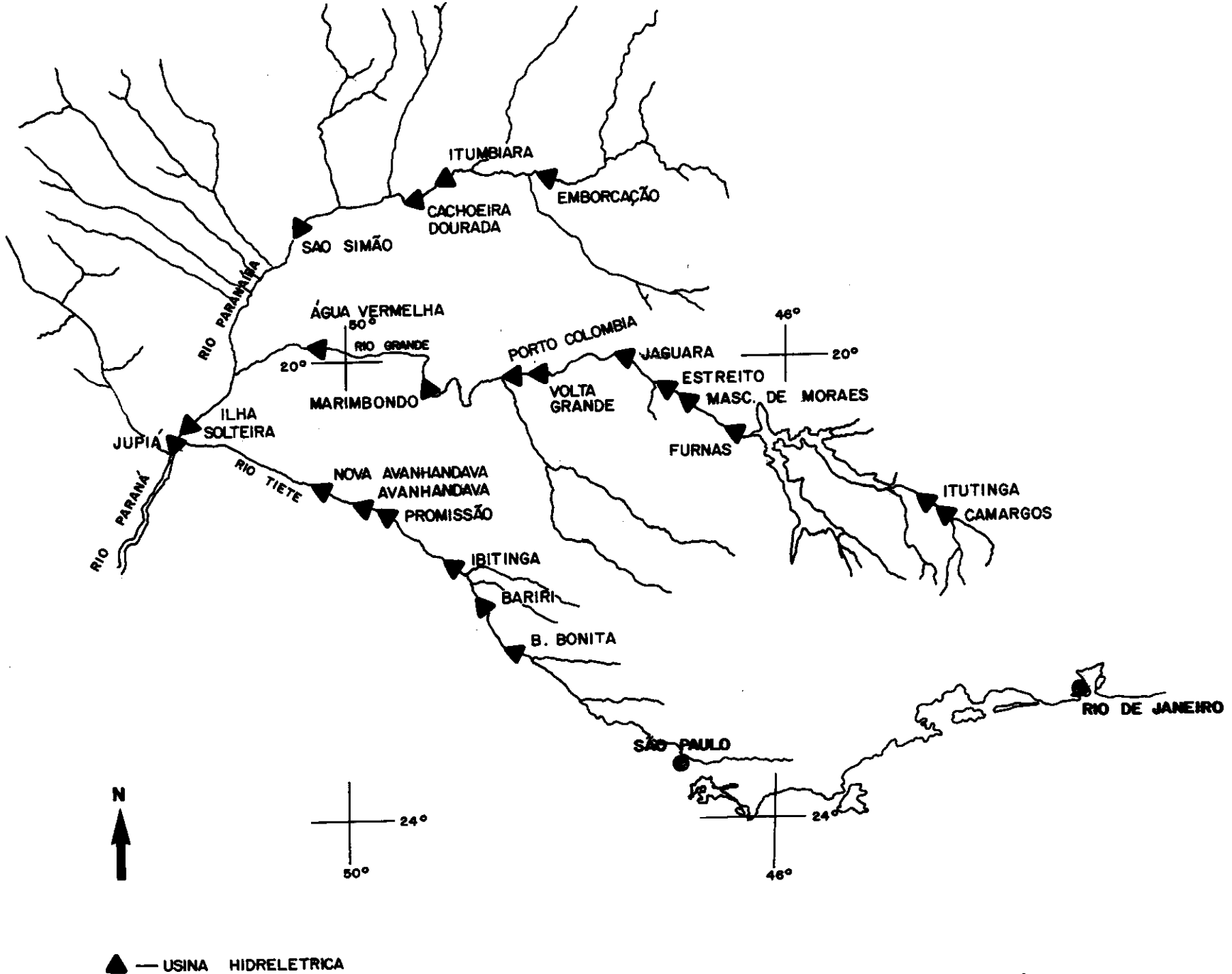


Figura II.3 - Sistema de Reservatórios dos rios Paranaíba, Grande e Tietê

iii) Fixado o período de retorno α^{-1}, calcula-se o volume total afluente.

Repetindo-se o procedimento acima para diversas durações, obtém-se uma relação entre o volume total afluente e a duração. É usual ajustar-se uma parábola do segundo grau aos pontos da curva volume-duração assim obtida. Como va(t) passa pela origem, $va(t) = at^2 + bt$. Neste caso, a equação (II.4) fornece

$$v_e = \frac{-(\bar{u} - b)^2}{4a} \qquad \text{(II.7)}$$

A restrição $t \geq 0$ é obedecida se (ver Figura II.4)

$$\bar{u} \leq \frac{d}{dt}\,(va(t))\Big|_{t=0} = b \qquad \text{(II.8)}$$

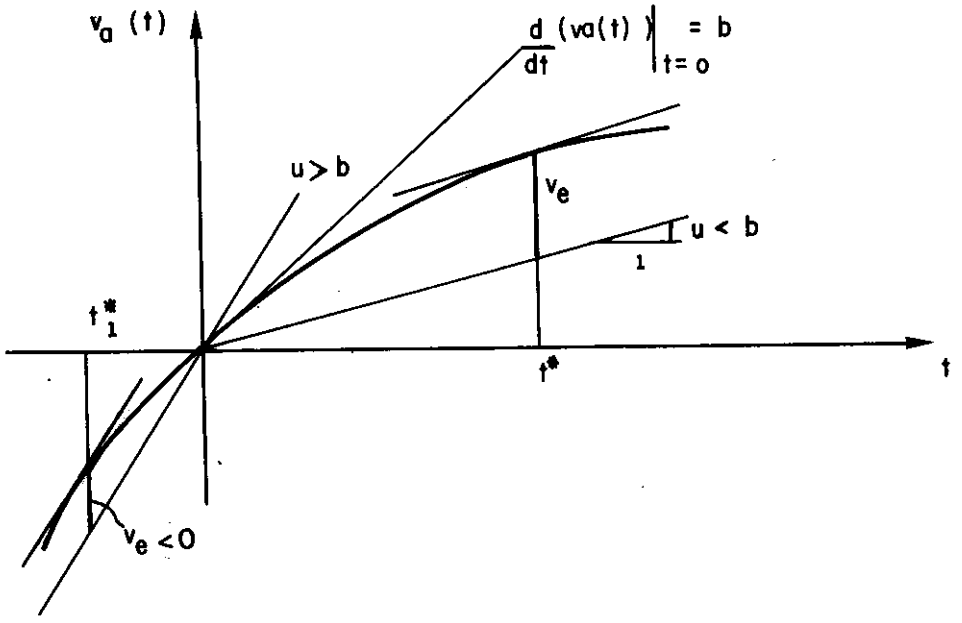


Figura II.4 - Região viável para a restrição de defluência u

A curva volume-duração para Furnas foi obtida a partir da série histórica de vazões naturais do posto São José da Barra, com 30 anos de observação, iniciando no ano hidrológico 1931-32 e terminando em 1960-61. As durações selecionadas foram 1,3,7,11,15,21 e 27 dias, sendo 1º de outubro a 30 de abril o período no qual as máximas vazões médias afluentes foram estimadas. Para o ajuste da distribuição log Pearson tipo III se fez uso do pacote REgional FREquency COmputation (REFRECO) desenvolvido pelo HEC |12|. A parábola do 2º grau ajustada aos pontos obtidos para o período de retorno de 25 anos é $va(t) = - 4{,}212539t^2 + 434{,}2645t$ $(10^6 m^3)$, onde t é dado em dias. A equação II.7 fornece para $\bar{u} = 4000$ m^3/s o volume de espera igual a 0,467 km^3.

II.2.1.1 Análise de Sensibilidade

O estimador da máxima vazão média afluente em t dias, com período de retorno α^{-1}, obtido a partir do ajuste da distribuição log Pearson tipo III aos dados históricos, é uma variável aleatória que depende do comprimento da amostra disponível. A tabela II.1 mostra a influência do tamanho da amostra sobre os volumes de espera para diversas vazões de restrição e período de retorno de 25 e 50 anos. A análise da tabelá revela que uma diminuição no histórico de até 5 anos causa pequenas alterações nos volumes de espera obtendo-se resultados próximos ao da melhor estimativa disponível (comprimento do histórico igual a 30 anos).

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	NÚMERO DE ANOS DO HISTÓRICO / $\bar{u}$ (m^3/s)	30		25	
		v_e (km^3)	t* (dias)	v_e (km^3)	t* (dias)
25	4000	0,467	10,5	0,545	11,1
	3500	1,032	15,7	1,131	16,0
	3000	1,819	20,8	1,929	20,9
50	4000	1,025	14,5	1,129	14,9
	3500	1,746	18,9	1,862	19,1
	3000	2,658	23,3	2,779	23,3

Tabela II.1 - Influência do comprimento do histórico sobre os volumes de espera em Furnas (Curvas volume-duração a partir do ajuste da distribuição log Pearson tipo III)

Um modo alternativo de se obter a curva volume-duração associada ao período de retorno selecionado consiste em substituir o ajuste da distribuição log Pearson tipo III pela estimação das máximas vazões médias afluentes a partir da sua distribuição empírica. Para tanto é necessário se dispor de um elevado número de hidrógrafas afluentes ao reservatório. Devido ao comprimento limitado do histórico, um modo de estimar estas máximas vazões médias é usar séries sintéticas. O modelo de geração de séries sintéticas de vazões diárias proposto por Kelman |13| apresentou bons resultados quando aplicado à série de São José da Barra (Barbosa, |14|). Ajustando-se os parâmetros deste modelo aos trinta anos da série histórica de vazões diárias naturais (sem interferência da operação dos reservatórios) do posto São José da Barra, com período de observação se estendendo de 1º de outubro de 1931 até 1º de outubro de 1961, foram geradas dez mil séries de vazões diárias, cada uma de 212 dias, correspondentes ao período chuvoso (1º de outubro a 30 de abril). As curvas volume-duração foram estimadas usando a distribuição empírica das máximas vazões médias afluentes obtidas a partir das dez mil séries sin

téticas. O mesmo procedimento foi realizado fazendo uso de apenas 25 anos da série histórica para se ter a variabilidade dos volumes de espera com o comprimento da amostra. A tabela II.2 apresenta os resultados obtidos para as mesmas vazões de restrição e períodos de retorno utilizados para construir a tabela II.1. Também neste caso, a retirada de 5 anos do histórico de vazões causa pequenas alterações nos volumes de espera.

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	NÚMERO DE ANOS DO HISTÓRICO / $\bar{u}$ m^3/s	30		25	
		v_e (km^3)	t* (dias)	v_e (km^3)	t* (dias)
25	4000	0,263	10,0	0,187	8,7
	3500	0,875	18,3	0,751	17,4
	3000	1,843	26,6	1,691	26,1
50	4000	0,663	15,5	0,570	14,3
	3500	1,500	23,3	1,352	21,9
	3000	2,673	31,1	2,466	29,6

Tabela II.2 - Influência do comprimento do histórico sobre os volumes de espera (v_e) em Furnas (curvas volume-duração a partir de séries sintéticas)

Para um mesmo histórico de vazões e período de retorno, as diferenças entre as curvas volume-duração obtida pelos dois métodos considerados - ajuste de distribuição log Pearson tipo III e geração de séries sintéticas - situam-se, para as durações consideradas, na faixa de 5%, isto é, dentro da precisão que se pode esperar para um ajuste de parábola do segundo grau por mínimos quadrados. Entretanto, um exame das tabelas II.1 e II.2 revela que os volumes de espera encontrados pelos dois métodos são muito diferentes, principalmente quando se tratar de vazões de restrição pouco severas. Por exemplo, para o período de retorno de 25 anos e vazão de restrição igual a 4000 m^3/s, o volume de espera fornecido pelo ajuste da distribuição log Pearson tipo III é cerca de 1,8 vezes

maior que aquele fornecido pelo uso de séries sintéticas. Já para vazão de restrição igual a 3000 m^3/s ambos os métodos fornecem praticamente o mesmo volume de espera (comprimento do histórico = 30 anos). A explicação para este comportamento é simples : para vazões de restrição pouco severas, pequenas diferenças entre as curvas volume-duração podem traduzir-se em grandes diferenças percentuais em termos de volumes de espera, pois estes são, em ambos os casos, "pequenos". Por outro lado, para vazões de restrição severas, as diferenças entre as curvas volume-duração deixam de representar grandes diferenças percentuais nos volumes de espera, pois neste caso eles são "grandes". A Figura II.5 ilustra este efeito para o exemplo acima considerado.

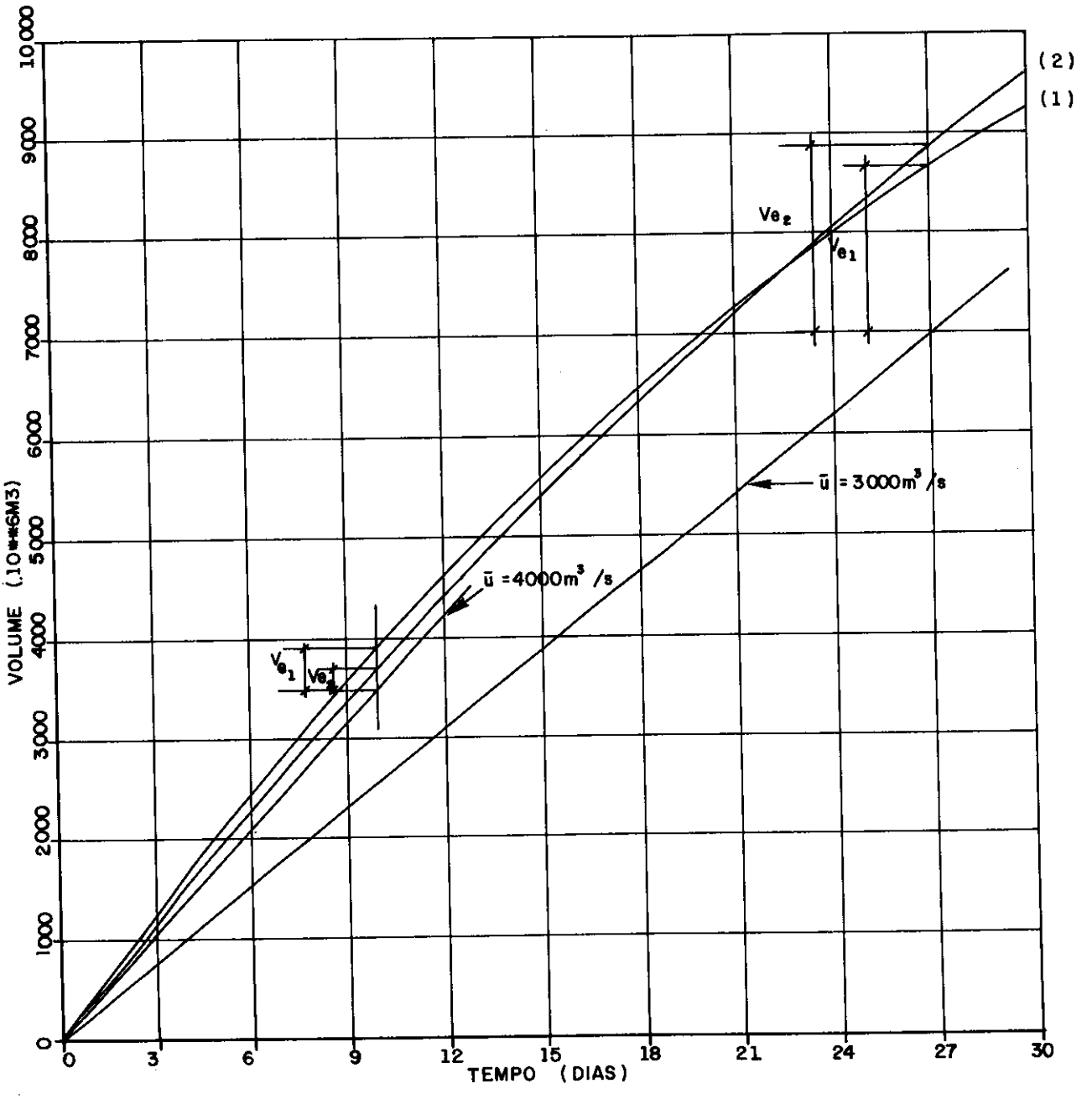


Figura II.5 - Diferença entre volumes de espera obtidos a partir da curva volume-duração para o período de retorno de 25 anos e comprimento de histórico de 30 anos:

(1) Ajuste de log Pearson tipo III

(2) Gerando séries sintéticas

II.2.1.2 Risco Simulado

Foi visto no item II.2 que o volume de espera calculado pelo método da curva volume-duração não garante, para cheia de qualquer duração, o período de retorno se a defluência for igual a $\bar{u}$ sempre que o volume vazio for menor que o volume de espera. Neste item, se faz uma avaliação da diferença entre o risco meta e o risco real, obtido por simulação.

Como o comprimento do histórico de vazões é muito pequeno para se avaliar os riscos de interesse, a simulação será feita usando as séries sintéticas de vazões descritas no item anterior.

A tabela II.3 apresenta os riscos associados às restrições de defluência em Furnas iguais a 4000, 3500 e 3000 m^3/s e períodos de retorno de 25 e 50 anos. Estes riscos foram obtidos imaginando-se que o volume livre no reservatório no início da simulação (1º de outubro) seja exatamente igual ao volume de espera recomendado (ver tabela II.2). Observa-se que, de fato, o risco simulado é maior que o risco meta, como previsto pela equação II.5 : por exemplo, para $\bar{u}$ = 3000 m^3/s e período de retorno meta de 25 anos, obteve-se 21,5 anos para o período de retorno simulado.

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	$\bar{u}$ (m^3/s)	RISCO SIMULADO
25	4000	0,0414
	3500	0,0408
	3000	0,0465
50	4000	0,0201
	3500	0,0218
	3000	0,0258

Tabela II.3 - Risco simulado associado aos volumes de espera calculados para Furnas para o dia 1º de outubro

II.3 Conclusões

O volume de espera determinado a partir do método de simulação tem um risco desconhecido em vista da dificuldade de se definir o que seja uma "cheia de projeto com período de retorno dado".

Para superar esta dificuldade, o método proposto por Beard | 9 | constrói para um período de retorno fixado uma curva de máximos volumes afluentes para diversas durações, chamada curva volume-duração. No entanto, prova-se (equação II.5) que o volume de espera fornecido por esta técnica não garante, para cheias de qualquer duração, o período de retorno meta. O estudo de caso com o reservatório de Furnas, utilizando séries sintéticas de vazões diárias, mostra que a diferença encontrada entre o risco meta e simulado é relativamente pequena.

O método da curva volume-duração aloca volume de espera constante para o período úmido. Isto pode acarretar problemas de operação já que se deve permitir o enchimento dos reservatórios durante o final do período úmido de forma que, no início do período seco, o volume armazenado seja o mais próximo possível do máximo permitido.

No capítulo seguinte apresenta-se uma metodologia que calcula a evolução diária dos volumes de espera de forma a atender ao risco selecionado. Esta metodologia pode ser estendida para incorporar a disponibilidade de previsão de vazões durante a operação ao processo de cálculo de volumes de espera (Kelman et al. |15|) o que não pode ser feito com o método da curva volume-duração.

CAPÍTULO III

O MÉTODO DOS VOLUMES CRÍTICOS

Este Capítulo descreve uma metodologia que determina, para cada dia da estação chuvosa, o volume de espera necessário para manter a probabilidade de inundação à jusante (emergência) igual a um valor pré-fixado (risco meta). Esta metodologia emprega um algoritmo recursivo sobre séries de vazões diárias, sem fazer uso da "hidrógrafa de projeto".

III.1 Conceitos Básicos e Notação

Sejam:

- h — Duração da estação chuvosa (dias)
- $v(t)$ — Volume armazenado (m^3) no início do dia t; t = 1 corresponde ao primeiro dia da estação chuvosa. Sem perda de generalidade, adota-se volume morto igual a zero
- v_m — Volume máximo armazenável (m^3) que não compromete a segurança da barragem caso ocorra a cheia de projeto dos órgãos de descarga. É o volume correspondente ao nível máximo normal operativo (NMNO). A operação do reservatório passa a visar a segurança da barragem sempre que $v(t) > v_m$
- $v_e(t)$ — Volume de espera (m^3) prescrito para o início do dia t. Deve-se procurar manter $v(t) \leq v_m - v_e(t)$ a fim de que o risco de alguma operação de emergência ($v(t) > v_m$) seja menor do que ou igual ao risco meta arbitrado para este dia
- $q(t,i)$ — Vazão total (m^3/dia) afluente ao reservatório (suposta conhecida) durante o dia t para a i-ésima série. Entende-se por série a hidrógrafa obtida a partir dos registros históricos ou gerada por algum modelo

$w(t,i)$ Vazão total (m^3/dia) não controlada afluente ao local que se quer proteger, durante o dia t para a i-ésima série (Figura III.1)

$d(t)$ Vazão total (m^3/dia) defluente do reservatório durante o dia t

$\bar{u}$ Vazão de restrição (m^3/dia) no ponto que se quer proteger. Ocorre cheia sempre que a vazão é maior que $\bar{u}$ (Figura III.1)

$d_m(t,i)$ Vazão máxima (m^3/dia) defluente do reservatório durante o dia t para a série i que não causa danos à jusante. Portanto

$$d_m(t,i) = \bar{u} - w(t,i) \qquad \text{(III.1)}$$

Apenas durante emergências $d(t)$ excede $d_m(t,i)$.

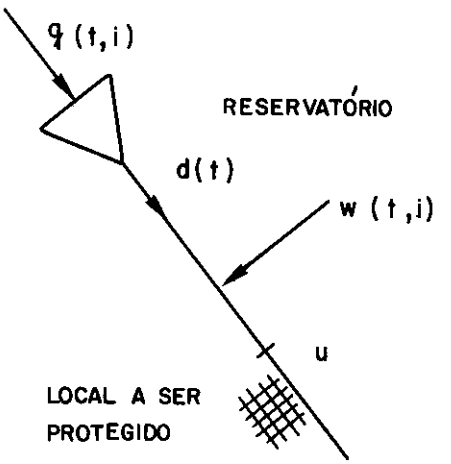


Figura III.1 - Representação esquemática das variáveis intervenientes no controle de cheias

III.2 Algoritmo Básico

Conhecendo-se as regras de operação e a série de vazões afluentes ao reservatório durante o período (t,h) a evolução do armazenamento fica unicamente determinada a partir do volume inicial v(t).

A Figura III.2 mostra a evolução do volume armazenado num reservatório durante o período (t,h) para a mesma série de afluências mas volumes iniciais diferentes. Se no dia t o volume armazenado inicial for $v_1(t)$ ocorre emergência durante o período de simulação, pois o volume vazio $v_m - v_1(t)$ é insuficiente para controlar a série de vazões afluentes. Por outro lado, se o volume inicial for $v_2(t)$ existe sempre um volume vazio no reservatório durante todo o período (t,h). Define-se volume crítico para o dia t e série i, c(t,i), como o máximo volume inicial para este dia tal que não ocorre nenhuma emergência entre o dia t e o início da estação seca, h + 1, para qualquer v(t) < c(t,i). A Figura III.2 mostra c(t,i) para o exemplo acima.

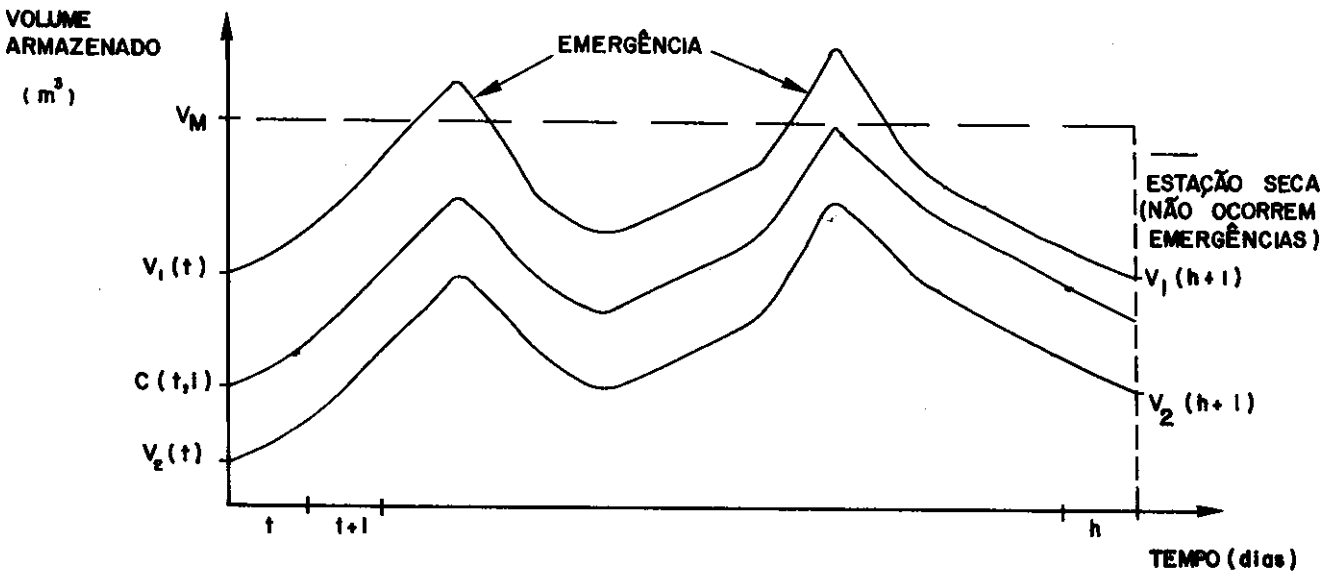


Figura III.2 - Evolução do armazenamento e volume crítico para o dia t e série i (c(t,i))

O volume vazio necessário e suficiente para que não ocorra emergência durante o período (t, h+1) é dado por $v_m - c(t,i)$ se a série de vazões afluentes neste período for conhecida (série i). Como em geral o futuro é desconhecido, repetindo-se o raciocínio acima para uma amostra aleatória de séries de vazões afluentes constrói-se o conjunto de volumes $\{c(t,i),\ i = 1,2,...\}$. Este conjunto pode ser usado para inferir a distribuição de probabilidades da variável aleatória C(t), chamada volume crítico para o dia t. A probabilidade de que ocorra alguma emergência até o início da estação seca, se o volume inicial é v(t) é dada por $P[C(t) < v(t)]$. Portanto, conhecida a distribuição dos volumes críticos para o dia t é possível estimar o risco de emergência em função apenas do estado do reservatório sem ser necessário simular a evolução do sistema.

A determinação dos volumes de espera para o caso de um reservatório é feita de forma recursiva. Para cada dia t da estação chuvosa, t = h, h-1,...,2,1 o algoritmo pode ser decomposto em duas etapas:

1) Cálculo do conjunto $\{c(t,i),\ i=1,2,...\}$

2) Cálculo do volume de espera como uma função do risco meta e da política de operação do reservatório.

Uma formulação alternativa para este algoritmo está descrita em Kelman et al. | 5 | onde, ao invés de se calcular volumes de espera, impõe-se restrições de vazão defluente mínima em função do estado de armazenamento do reservatório.

III.2.1 Determinação do Volume de Espera para o dia t

O volume de espera para o dia t, $v_e(t)$, tem por objetivo garantir que o risco de alguma emergência entre os dias t e h+1 seja igual a um valor pré-fixado.

O volume de espera para o dia t é dado por

$$v_e(t) = v_m - c_\alpha(t) \qquad \text{(III.2)}$$

onde $c_\alpha(t)$ é o volume que faz a probabilidade de emergência até o início da estação seca ser igual ao risco meta $\alpha(t)$, isto é

$$P[C(t) < c_\alpha(t)] = \alpha(t) \qquad \text{(III.3)}$$

onde C(t) é a variável aleatória "volume crítico para o dia t" e $\alpha(t)$ é o risco meta arbitrado externamente ao algoritmo.

Note-se que o risco meta $\alpha(t)$ não é o risco de ocorrer alguma emergência em t mas sim no intervalo (t, h+1) (ver Figura III.3). Portanto, a função $\alpha(t)$ é necessariamente não crescente. Em outras palavras, o volume de espera para cada

Figura III.3 - Risco meta no intervalo (t,h+1), $\alpha(t)$

dia da estação chuvosa pode ser determinado de modo tal que a probabilidade de ocorrer alguma emergência seja uma função do número de dias que faltam para o início do período seco.

A estimação de $c_\alpha(t)$ é feita a partir do conjunto {c(t,i), i=1,2,...} cuja determinação é descrita no próximo item. A Figura III.4 ilustra a determinação de $v_e(t)$ a partir de um histograma de c(t,i), i=1,2,...

Suponhamos que seja conhecido o conjunto de volumes de espera $v_e(t)$, t = 1,2,...h e, portanto, $c_\alpha(t)$, t=1,2...h. O conhecimento de $c_\alpha(t+1)$ pode ser usado para definir uma regra de operação para o reservatório durante o dia t em função do volume armazenado e da vazão afluente que leva em conta o

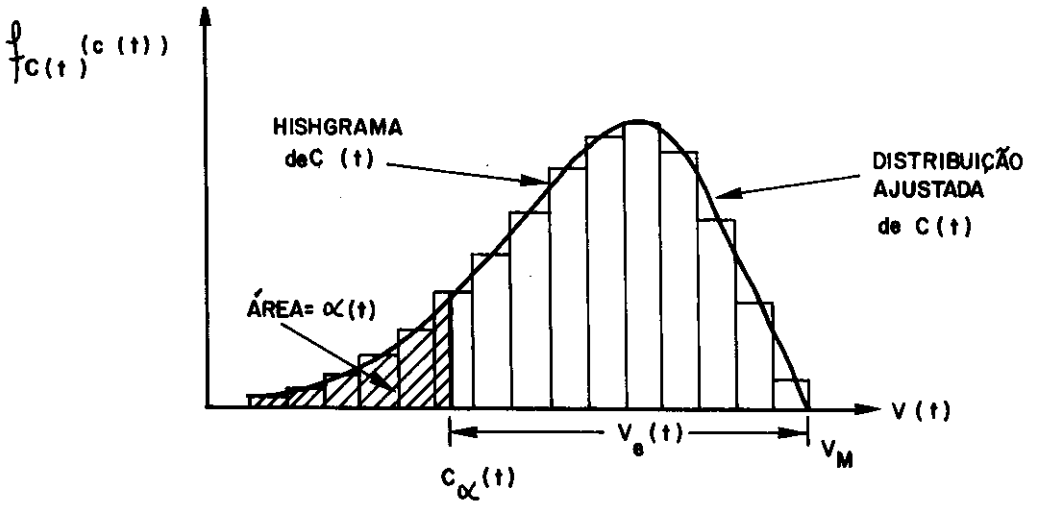


Figura III.4 - Determinação de $v_e(t)$

controle de cheias. Numa usina hidroelétrica, caso não haja restrição alguma à operação do reservatório, o volume defluente é igual ao volume necessário para atendimento do mercado de energia, qualquer que seja o volume armazenado. A inclusão do controle de cheias faz com que a operação do dia t passe a visar preferencialmente $c_\alpha(t+1)$, o que corresponde a deixar um volume vazio no reservatório no início do dia (t + 1) igual ao volume de espera meta, v_e (t+1). Pela equação de continuidade

$$v(t+1) = v(t) + q(t,i) - d(t) \qquad \text{(III.4)}$$

Substituindo-se v(t+1) por $c_\alpha(t+1)$, define-se

$$d_\alpha(t,i) = v(t) + q(t,i) - c_\alpha(t+1) \qquad \text{(III.5)}$$

que é uma regra linear com v(t) se considerarmos que tanto $c_\alpha(t+1)$ quanto a vazão afluente ao reservatório q(t,i) são conhecidos no dia t.

A equação (III.5) representa apenas uma das restrições à operação do reservatório. A regra de operação efetiva

mente adotada é uma função complexa e depende de um grande número de fatores, tais como : metas de geração energética, defluências mínimas para navegação e qualidade d'água, estado dos outros reservatórios do sistema, previsões de afluência , etc.. Todas estas restrições serão representadas como uma regra aproximada em função do armazenamento, como a curva ABDGM na Figura III.5. Para $v(t) < v_B$, o volume defluente é limitado pela disponibilidade de água (supõe-se $q(t,i)$ conhecido) . Para $v_B < v(t) < v_D$ é sempre possível atender a demanda energética. Para $v_D < v(t) < v_G$ a regra energética conduzirá a $v(t+1) > c_\alpha(t+1)$. Neste caso opta-se por $d_\alpha(t,i)$ para atingir o volume de espera do dia t+1, $v_e(t+1)$. Para $v(t) > v_G$ o limite de vazão defluente máxima, d_m, não permite que se atinja $v_e(t+1)$. Note-se que esta regra pode ser diferente para cada dia t e cada seqüência i.

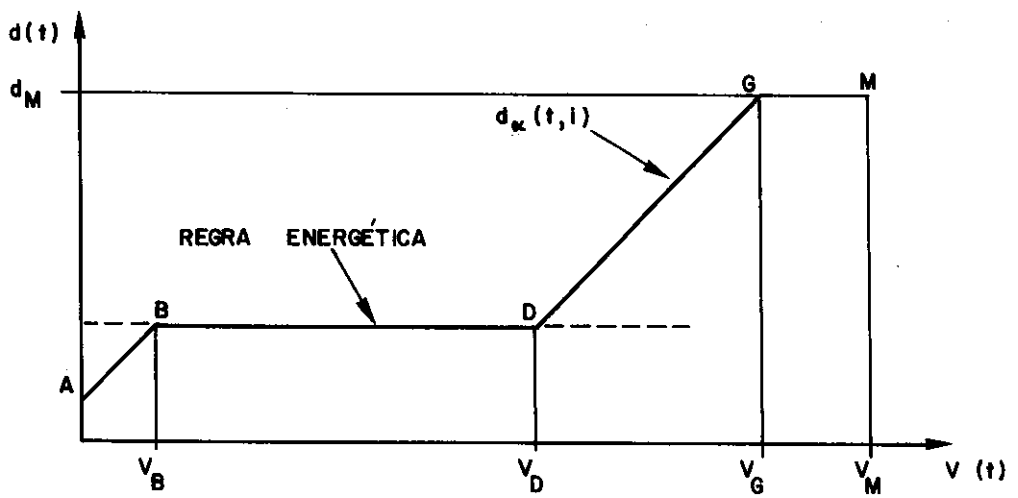


Figura III.5 - Regra de operação aproximada que incorpora restrições para controle de cheias

III.2.2 Determinação do Volume Crítico Para o Dia t

Conhecido o conjunto de volumes críticos para o dia t+1, {c(t+1, i), i=1,2,...} e as vazões afluentes durante o dia t, {q(t,i), i=1,2,...} define-se a regra de operação crítica para o dia t e série i, $d_c(t,i)$, como a regra que fornece, para cada estado de armazenamento v(t) a defluência necessária para atingir o volume crítico c(t+1, i) ao início do dia t+1. Pela equação da continuidade

$$c(t+1,i) = v(t) + q(t,i) - d_c(t,i) \qquad \text{(III.6)}$$

Como c(t+1,i) e q(t,i) são supostos conhecidos para efeito do algoritmo, $d_c(t,i)$ é uma função linear de v(t):

$$d_c(t,i) = v(t) + q(t,i) - c(t+1,i) \qquad \text{(III.7)}$$

A regra crítica determina para cada série i se o volume defluente durante o dia t conduzirá ou não a emergência no período (t+1, h+1).

É importante notar, neste ponto, que a regra crítica $d_c(t,i)$ é função do volume crítico da série i para o dia (t+1), c(t+1,i) e, portanto, desconhecida quando da operação do reservatório enquanto que $d_\alpha(t,i)$, dada pela Equação III.5 em função do volume de espera para o dia (t+1), é conhecida quando da operação, sendo utilizada para montar a regra aproximada ABDGM (ver Figura III.5).

A Figura III.6 ilustra o cálculo do volume crítico c(t,i) correspondente à série i. Se $v(t) > v_c$, a defluência fornecida pela regra aproximada será sempre menor que a requerida pela regra crítica $d_c(t,i)$. Portanto, $v(t+1) > c(t+1,i)$ e haverá pelo menos uma emergência no intervalo (t+1, h+1). Pela definição de volume crítico, $c(t,i) \leq v_c$. Uma argumentação similar para $v(t) < v_c$ leva a concluir que $c(t,i) \geq v_c$. Logo, o volume crítico para a série i corresponde à interseção da regra crítica $d_c(t,i)$ com a regra aproximada ABCDGM.

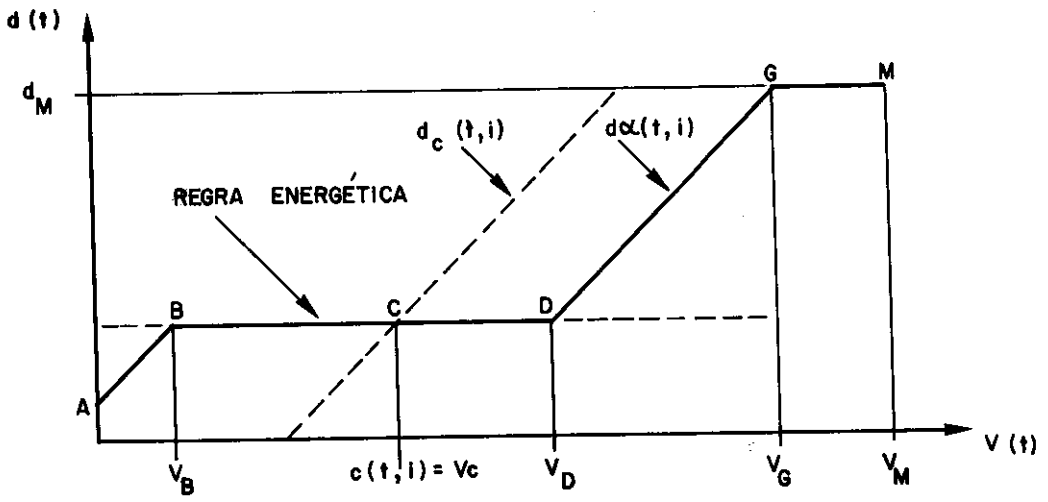


Figura III.6 - Regra de operação aproximada para o cálculo do volume crítico

Existem dois tipos de não interseção:

a) A regra crítica fica sempre <u>acima</u> da regra aproximada. Neste caso, a vazão dada pela regra aproximada é sempre inferior à regra crítica. O volume crítico é, portanto, igual a zero (Figura III.7).

b) A regra crítica fica sempre <u>abaixo</u> da regra aproximada. Neste caso, a vazão dada pela regra aproximada é sempre superior à regra crítica. O volume crítico é, portanto, igual a v_m (Figura III.7).

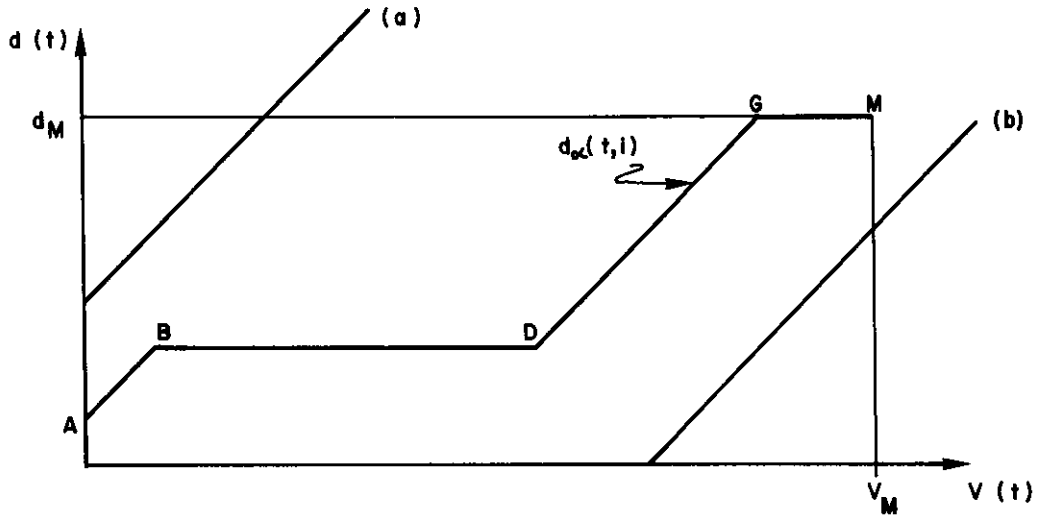


Figura III.7 - Casos de não intercessão
(a) Regra crítica sempre acima de ABDGM
(b) Regra crítica sempre abaixo de ABDGM

O algoritmo recursivo apresentado exige o fornecimento da condição de fronteira para t = h+1. Como não há expectativa de cheias no período seco adota-se

$$c(h+1,i) = v_m \quad \forall i \tag{III.8}$$

e portanto $v_e(h+1) = 0$.

A Figura III.8 apresenta os passos principais do algoritmo.

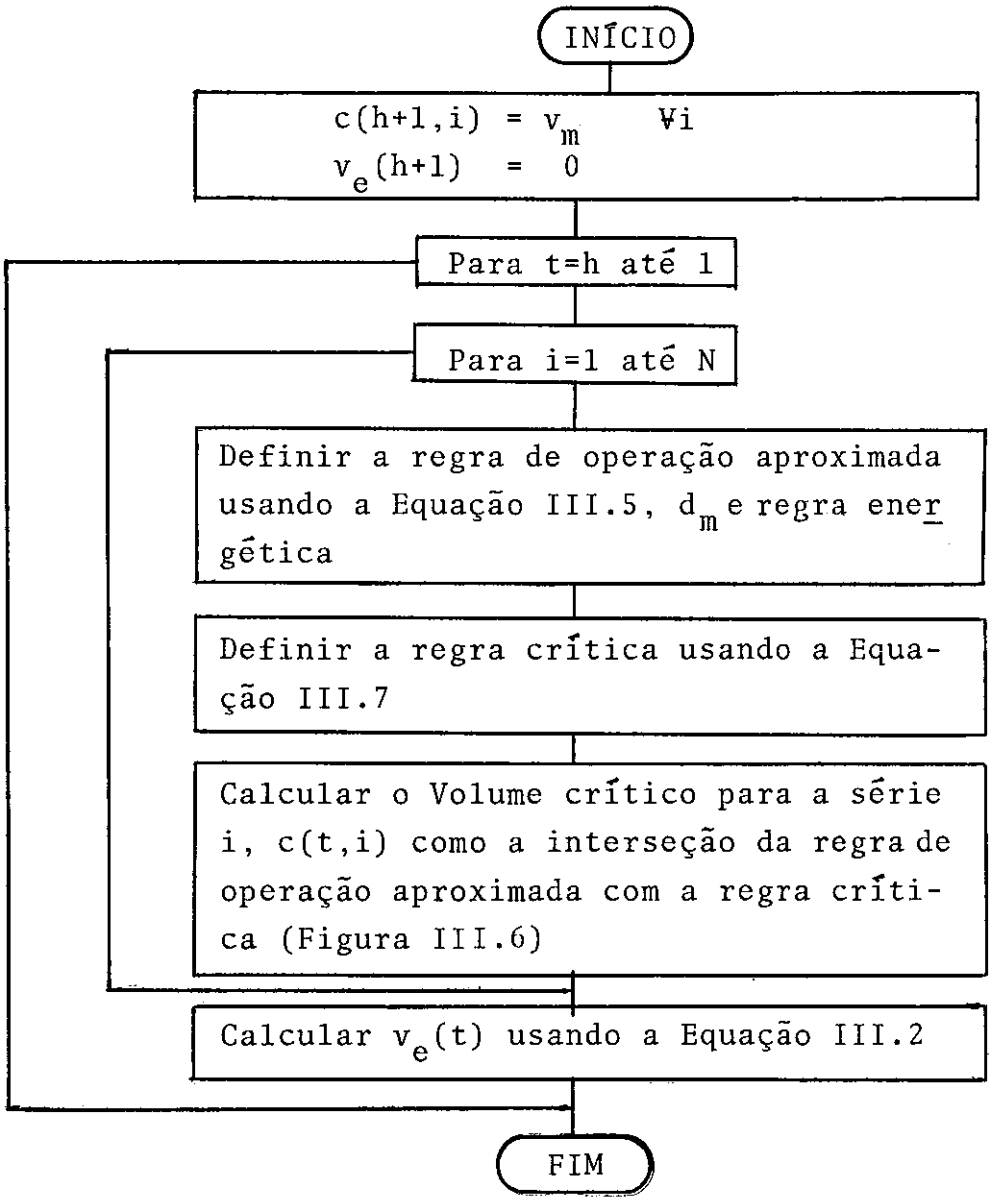


Figura III.8 - Fluxograma do Algoritmo

O algoritmo fornece como resultado um conjunto de volumes de espera para cada dia da estação chuvosa, $v_e(t)$, t=1, ...h, tal que a probabilidade de ocorrência de emergência no período (t,h+1) é igual ao risco meta $\alpha(t)$ pré-estabelecido. Estes volumes de espera são usados para montar, a cada dia t, a regra de operação simplificada do reservatório, ABDGM (ver Figura III.5) que fornece a defluência em função do volume armazenado e da vazão afluente.

III.2.3 Uso de Séries Sintéticas

Como foi visto no item III.2.1 a determinação do volume de espera é feita a partir da distribuição empírica de probabilidades dos volumes críticos para o dia t, C(t), fornecida pelo algoritmo recursivo. Esta determinação pode ser feita de dois modos:

a) Ajustando-se alguma função de densidade de probabilidades ao conjunto {c(t,i), i=1,2,...} ou

b) Interpolando-se na distribuição empírica.

Na primeira alternativa, existe o problema de se encontrar para cada dia t distribuição que melhor se ajuste aos valores de c(t,i), i=1,2,.... Além disso, como os registros históricos de vazões diárias tem comprimento limitado (em geral menor que 50 anos) e os quantis de interesse ($\alpha(t)$) são menores que 1/25, os valores obtidos para $c_\alpha(t)$ podem sofrer muito com a variação amostral.

A alternativa de obter $c_\alpha(t)$ por interpolação na distribuição empírica de C(t) pressupõe a disponibilidade de longuíssimos registros de vazões diárias. Estes registros podem ser obtidos através da hidrologia estocástica, fazendo-se uso de algum modelo de geração de vazões diárias. Esta alternativa dispensa a seleção e ajuste de uma distribuição de probabilidades ao conjunto {c(t,i), i=1,2...} (tarefa a ser feita durante a execução do algoritmo) e permite que tanto a seleção quanto o ajuste do modelo de geração seja um procedimento executado independentemente do processo de cálculo do volume de espera. Este é o enfoque adotado neste trabalho.

III.3 Aplicação

O método acima descrito foi usado para determinar os volumes de espera para o reservatório de Furnas, cujas características estão descritas no item II.2.1.

O período chuvoso se extende de outubro a abril

(h = 212 dias). Como operação energética para este período usou-se a média mensal turbinada durante os anos de 1977 a 1980 (Tabela III.1).

	MÊS							MÉDIA
VAZÃO (m^3/s)	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	
	1120	849	551	576	607	857	747	758

Tabela III.1 - Regra de Operação Energética (m^3/s) para Furnas

O mesmo conjunto {q(t,i), i=1,2,...} de séries sintéticas de vazões diárias gerada pelo modelo proposto por Kelman |13| a partir do ajuste de seus parâmetros aos 30 anos de vazões naturais no posto São José da Barra (ver item II.2.1.1) foi utilizado pelo algoritmo, sendo o seu número (10000 séries) fixado como o número a partir do qual o acréscimo de novas séries não causa variação em $c_\alpha(t)$, t=1,2,...h para a curva de risco meta adotada (ver item III.3.1).

III.3.1 Critério de Risco

Como foi visto no item III.2.1 a função risco meta $\alpha(t)$ é necessariamente não crescente. Logo, o período de retorno fixado para o evento emergência durante a época de cheias é igual a $[\alpha(1)]^{-1}$. O nível de risco $\alpha(t)$, t=2,...h é arbitrário e portanto existem inúmeras funções $\alpha(t)$ não crescentes tais que $[\alpha(1)]$ seja igual ao inverso do período de retorno estabelecido. Neste item se faz uma análise de sensibilidade do volume de espera para três curvas de risco meta: constante, exponencial e abatimento do "risco de operação energética.

III.3.1.1 Risco Meta Constante

A função risco meta constante consiste em fazer $\alpha(t) = \alpha$ para t=1,2,...h onde α é igual ao inverso do perío-

do de retorno estabelecido. A evolução de $c_\alpha(t)$ para o período de retorno de 25 anos e $\alpha(t) = 0,04$, $t=1,2...h$ tem máximo volume de espera de 3,033 km^3 (aproximadamente 18% do volume útil de Furnas) e a média dos volumes alocados para o controle de cheias é 0,674 km^3.

III.3.1.2 Risco Meta Exponencial

Shen e Todorovic |16| observam que o processo "ocorrência de vazões acima de d_m" pode ser aproximadamente modelado por um processo de Poisson. Portanto, é razoável definir o processo "ocorrência de emergência" também como um processo de Poisson. Adotando-se esta hipótese, o tempo entre eventos (ou, para um dado instante o intervalo de tempo até o evento seguinte) tem distribuição exponencial. A função risco meta fica

$$\alpha(t) = 1 - \exp\{\lambda[t-(h+1)]\} \ , \ t=1,2,...h; \ \lambda > 0 \qquad \text{(III.9)}$$

onde o período de retorno para uma emergência é $[\alpha(1)]^{-1}$. A Figura III.9 ilustra essa lei de controle para h = 212 e diferentes $[\alpha(1)]^{-1}$.

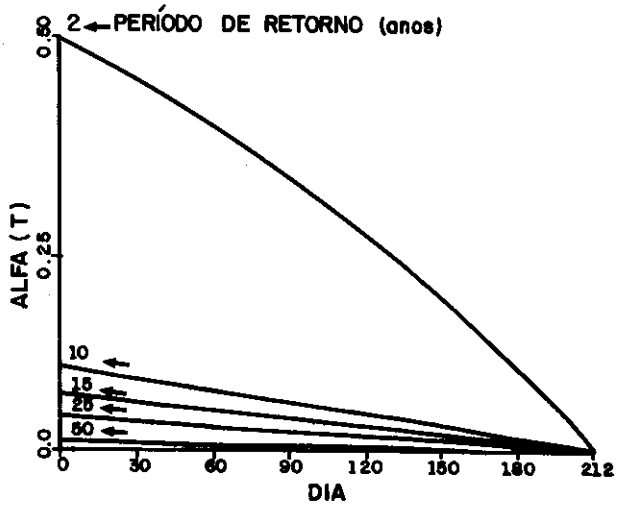


Figura III.9 - Risco meta exponencial para períodos de retorno 2, 10, 15, 25 e 50 anos

A evolução de $c_\alpha(t)$ para o reservatório de Furnas para $\alpha(t)$ seguindo a Equação III.9 e $[\alpha(1)]^{-1}$ =25 anos tem volume de espera máximo de 1,128 km^3 (cerca de 7% do volume útil) e a média dos volumes de espera alocados para controle de cheias é 0,258 km^3.

III.3.1.3 Abatimento do Risco de Operação Energética

Como foi visto no item III.2, a probabilidade de emergência durante o período (t, h+1) é dada por P[C(t) < v(t))]. se o volume inicial for v(t). Isto é, conhecida a distribuição dos volumes críticos para o dia t, é possível estimar o risco de emergência em função apenas do armazenamento do reservatório. Lembrando que no algoritmo descrito para o cálculo de c(t,i) as regras de operação são fornecidas pelo usuário, é possível avaliar o risco de qualquer política imposta à operação. Por exemplo, considerando que a usina de Furnas tenha como objetivo apenas o atendimento da demanda energética (isto é, $v_e(t) = 0$, $\forall t = 1,2,...$), pode-se estimar o "risco de operação energética, $\alpha_E(t)$". Na Figura III.10 que mostra a evolução de $\alpha_E(t)$ pode-se observar que o período de retorno de alguma emergência para a operação energética é cerca de 11 anos.

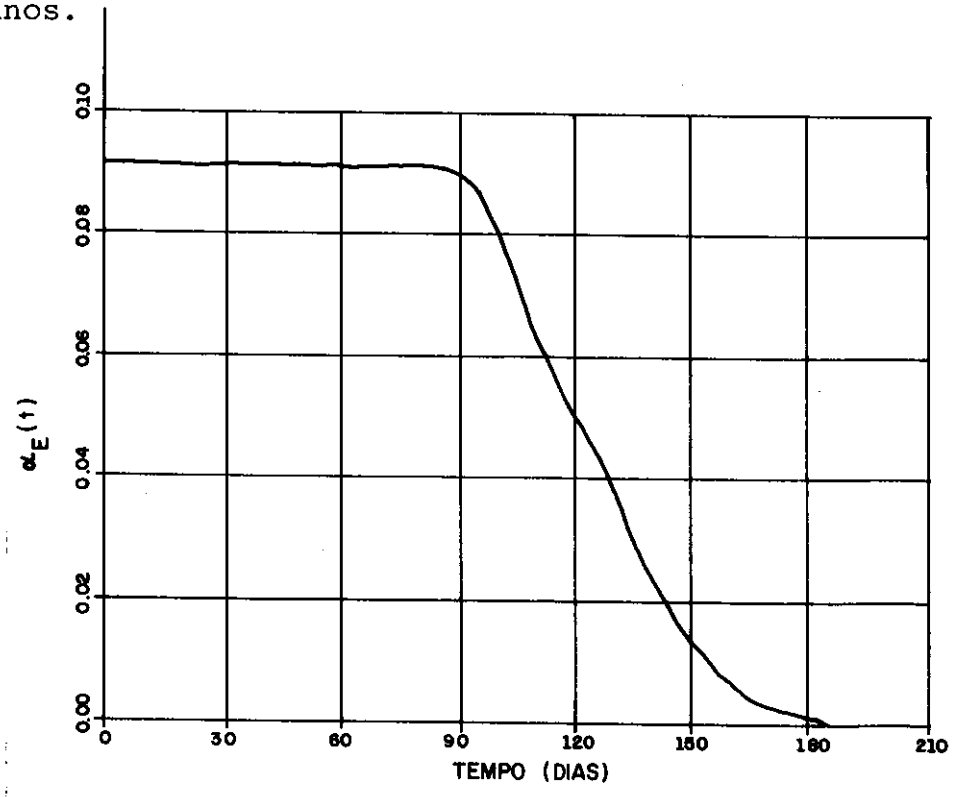


Figura III.10 - Risco de operação energética, $\alpha_E(t)$ para o reservatório de Furnas.

A função $\alpha_E(t)$ pode ser utilizada para fornecer uma curva de risco meta $\alpha(t)$ tal que

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_E(t)}{k} \quad , \quad t = 1,2,...h \qquad \text{(III.10)}$$

onde k é um fator que torna $[\alpha(1)]^{-1}$ igual ao período de retorno selecionado. Em outras palavras, o critério para $\alpha(t)$ passa a ser "abater" o risco de operação energética.

Para o reservatório de Furnas, a evolução de $c_\alpha(t)$ para o período de recorrência de 25 anos tem máximo volume de espera igual a 0,351 km^3 (aproximadamente 2% do volume útil) e a média dos volumes de espera alocados para controle de cheias é 0,162 km^3.

A Tabela III.2 abaixo resume os resultados obtidos e a Figura III.11 apresenta a evolução de $v_e(t)$ para o período de retorno de 25 anos segundo as três hipóteses para o risco meta $\alpha(t)$ acima expostas : constante, exponencial e igual ao risco de operação energética abatido.

VOLUME DE ESPERA (km^3)	RISCO META $\alpha(t)$		
	CONSTANTE	EXPONENCIAL	$\frac{\alpha_E(t)}{k}$
MÉDIO	0,674	0,258	0,162
MÁXIMO	3,033	1,129	0,351

TABELA III.2 - Variação dos Volumes de Espera no Reservatório de Furnas sob Diferentes Hipóteses para o Risco Meta (período de retorno : 25 anos)

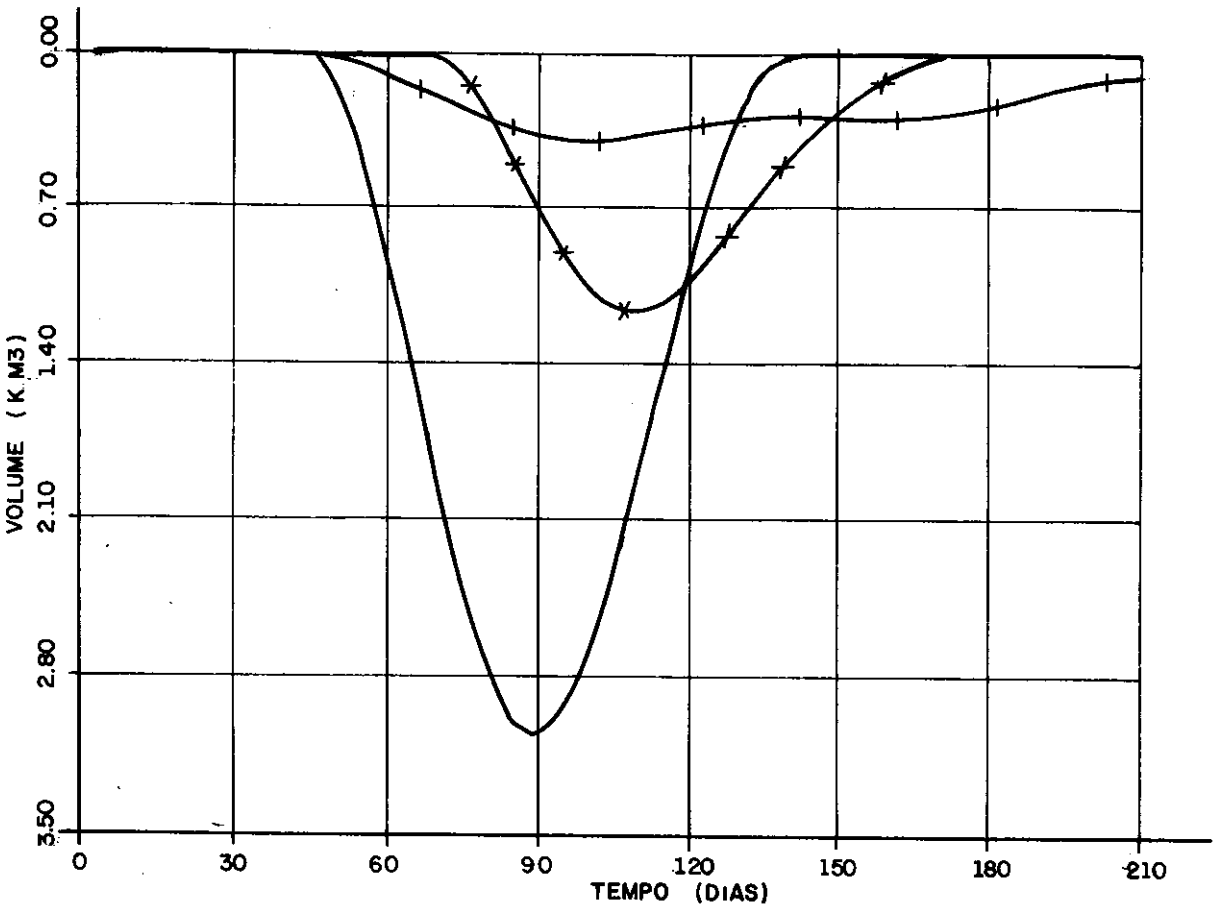


Figura III.11 - Evolução diária de $v_e(t)$ para o reservatório de Furnas segundo diferentes riscos meta: constante (——) exponencial (-X-X-) e risco de operação energética abatido (-+-+-) (período de retorno: 25 anos)

Todas as curvas de $v_e(t)$ acima expostas atendem o requisito básico de garantir o período de retorno especificado para o evento emergência. O critério de abater o risco de operação energética fornece os menores volumes de espera tanto em média quanto máximo. Além disso, o abatimento de $\alpha_E(t)$ faz com que a taxa máxima de probabilidade de emergência num dia quando há controle $(d(\alpha(t))/dt)$ coincida com a taxa máxima de probabilidade de ocorrência de inundação à jusante quando não há controle $(d(\alpha_E(t))/dt)$. Isto é, a redução de $\alpha_E(t)$ mantém o comportamento natural do rio no que diz respeito à época de ocorrência de inundações. Em vista disso, neste trabalho adota-se o abatimento do risco de operação energética como critério para $\alpha(t)$. Não se tratou da questão de encontrar a função $\alpha(t)$ que minimize o volume de espera alocado.

III.3.2 Regra Energética

A vazão energética tem influência na distribuição dos volumes críticos : um aumento sistemático Δd_E em $d_E(t)$ faz com que todos os volumes críticos $c(t,i)$ tais que $c(t+1,i)<c_\alpha(t+1)$ sejam transladados de exatamente Δd_E (ver Figura III.12). No entanto, para uma curva de risco meta variável com o tempo, este efeito não é cumulativo pois, à medida que o risco meta aumenta o número de séries cujo $c(t,i)$ é dado pela interseção com a regra energética também aumenta. Como é de se esperar que os volumes críticos recém incluídos no conjunto daqueles à esquerda de $c_\alpha(t)$ sejam maiores que os já existentes, em geral a variação em $c_\alpha(t)$ é da ordem de Δd_E.

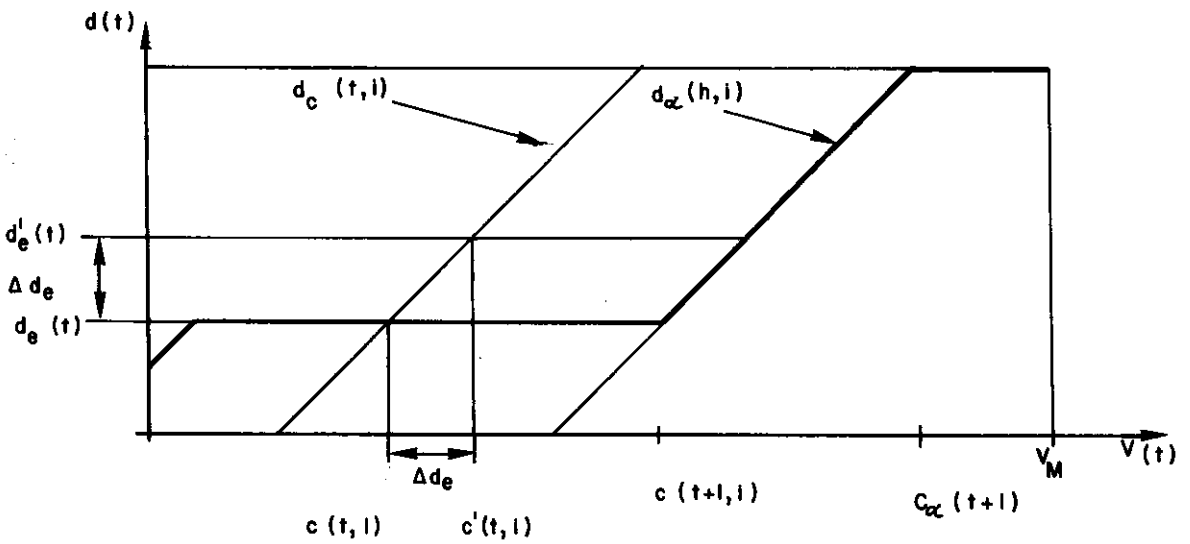


Figura III.12 - Influência da variação da regra energética(Δd_E) sobre o volume crítico c(t,i)

Para avaliar o efeito da hipótese simplificadora com relação à regra energética sobre a média dos volumes de espera recomendados procedeu-se a uma análise de sensibilidade.

Adotando-se como regra energética $d_E(t)$, t=1 , 2,...h a vazão média turbinada durante o período chuvoso (758m^3/s) ao invés dos valores mensais constantes da Tabela III.1, observou-se que os volumes de espera recomendados não sofreram variação alguma. Além disso, a diferença entre a média dos volumes de espera calculados para $d_E(t)$ = 200 m^3/s (t=1,2,...h) - vazão mínima necessária para garantir a navegação - e para $d_E(t)$ = 1120 m^3/s, $\forall t$ - maior vazão média turbinada, ver Tabela III.1 - foi igual a 0,014 km^3, valor que permite dizer que a evolução de $c_\alpha(t)$ não sofreu qualquer modificação significativa. Se a regra energética for, durante toda a estação chuvosa, igual a 1516 m^3/s (duas vezes a média) a diferença encontrada para a média dos volumes de espera calculados a partir de $d_E(t)$ = 758 m^3/s (0,162 km^3) é 0,027 km^3 (cerca de 17%). Cabe observar, no entanto, que a vazão média afluente a Furnas no período considerado é 1146 m^3/s e portanto o caso em foco representa uma situação extrema. Comportamento semelhante foi observado ao se fazer uso da curva exponencial dada pela equação III.9 para o risco meta.

Em vista destes fatos, pode-se concluir que os volumes de espera são pouco sensíveis com relação à simplificação adotada para a regra energética e que basta uma aproximação razoável para $d_E(t)$ para se obter a curva $c_\alpha(t)$.

III.3.3 Intervalo de Discretização

O tempo de CPU necessário para calcular, a intervalos diários, a evolução dos volumes de espera é de aproximadamente 6 minutos (VAX-11/780). Com o objetivo de reduzir este tempo de computação, foi pesquisado o efeito de se adotar , ao invés de vazões médias diárias, vazões médias afluentes em Δt dias, Δt = 1,2,..., interpolando-se linearmente os valores de $c_\alpha(t)$ obtidos para cada Δt considerado para obter a evolução diária dos volumes de espera.

O intervalo de um dia representa, obviamente, a melhor estimativa para $c_\alpha(t)$. O uso de vazões médias faz com que as flutuações das vazões diárias sejam amortecidas e, portanto, os picos de vazão máxima diminuam. Este fato tem reflexos sobre $c_\alpha(t)$ pois o que se pretende é exatamente controlar os picos de vazão.

Os resultados obtidos indicam que, para intervalos de tempo Δt de até quatro dias a curva de volumes de espera não se afasta significativamente daquela obtida com $\Delta t = 1$ dia (máximo afastamento observado igual a 0,02 km^3). Note-se que para $\Delta t = 4$ dias o tempo de CPU se reduz a cerca de 1,5 minutos. Portanto, conclui-se que para Furnas o cálculo dos volumes de espera pode ser feito a intervalos de até 4 dias, com sensível redução de tempo de CPU.

III.3.4 Comprimento do Histórico de Vazões

A evolução diária dos volumes de espera é obtida em função das séries sintéticas de vazões diárias utilizadas pelo algoritmo. Para avaliar a sensibilidade dos volumes de espera estimados pelo método dos volumes críticos com respeito ao comprimento da amostra de vazões históricas foram retirados os últimos cinco anos do registro e ajustados os parâmetros do modelo proposto por Kelman |13| aos 25 anos restantes (1931-32 a 1955-56) de vazões naturais diárias no posto São José da Barra.

A Tabela III.3 apresenta os valores médios e máximos de $v_e(t)$ obtidos para o período de retorno de 25 e 50 anos, utilizando como risco meta o abatimento do risco de operação energética e vazão de restrição de 4000 e 3000 m^3/s para o reservatório de Furnas. Novamente, considerou-se 3000 m^3/s como vazão de restrição apenas para realçar as diferenças.

Um exame da Tabela III.3 a seguir revela que o método dos volumes críticos é bastante estável no que diz respeito a variações no comprimento da série histórica de vazões diárias, no caso de Furnas.

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	NÚMERO DE ANOS DO HISTÓRICO / $\bar{u}$ (m^3/s)	30		25	
		v_e (km^3)		v_e (km^3)	
		MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIO	MÁXIMO
25	4000	0,162	0,351	0,147	0,414
	3000	1,330	2,735	1,281	2,918
50	4000	0,359	0,817	0,330	0,763
	3000	1,782	3,631	1,809	3,538

Tabela III.3 - Variabilidade dos Volumes de Espera em Função do Comprimento do Histórico para o Reservatório de Furnas

III.3.5 Conclusões

A metodologia dos volumes críticos proposta neste capítulo se revelou eficaz na determinação de uma curva de volumes de espera que atenda a um risco pré-especificado para ocorrência de inundações à jusante. O estudo de caso acima permite concluir, para o reservatório de Furnas, que :

- Usar como critério de risco o abatimento do risco de operação energética permite que o reservatório fique o mais cheio possível, respeitando-se as restrições de risco para cheias

- A simplificação quanto à demanda energética provou ser satisfatória

- O intervalo de tempo Δt suficiente para a obtenção da curva $c_\alpha(t)$ é igual a 4 dias

- Os volumes de espera fornecidos pela metodologia dos volumes críticos são pouco sensíveis a variações no tamanho da amostra de vazões diárias disponível.

CAPÍTULO IV

SISTEMA DE RESERVATÓRIOS INTERLIGADOS

Os Capítulos anteriores tratam do cálculo do volume de espera em um único reservatório. Este Capítulo estuda o problema de alocação de volumes de espera num sistema de reservatórios interligados, em série (cascata) ou em paralelo.

IV.1 Colocação do Problema

Um dos dados de entrada para o cálculo dos volumes de espera é a série de vazões afluentes ao reservatório. Numa cascata, a vazão total afluente é composta da vazão devida à área de drenagem incremental entre os reservatórios sucessivos (vazão não controlada) e da vazão defluente dos reservatórios imediatamente à montante.

Estas vazões defluentes dependem das regras de operação adotadas em cada reservatório. Logo, para obter a vazão afluente ao i-ésimo reservatório é necessário simular a operação dos reservatórios situados à montante. A série de vazões afluentes assim obtida leva em consideração o controle de cheias exercido pelo sistema. Portanto, o cálculo do volume de espera para cada reservatório deve ser feito seqüencialmente, de montante para jusante. A Figura IV.1 mostra como estabelecer os volumes de espera dos reservatórios de uma cascata, quando à jusante de cada um deles existe uma restrição de vazão máxima. As decisões a serem tomadas antes de executar os procedimentos constantes do fluxograma são:

a) Definir os reservatórios cuja operação será simulada;

b) Definir os reservatórios que atuarão no controle de enchentes;

c) Definir as vazões defluentes máximas e a função de risco meta associadas a cada reservatório em b;

d) Definir o método de propagação de vazões entre os reservatórios na cascata;

e) Definir as metas energéticas de cada reservatório e

f) Definir os volumes iniciais de cada reservatório.

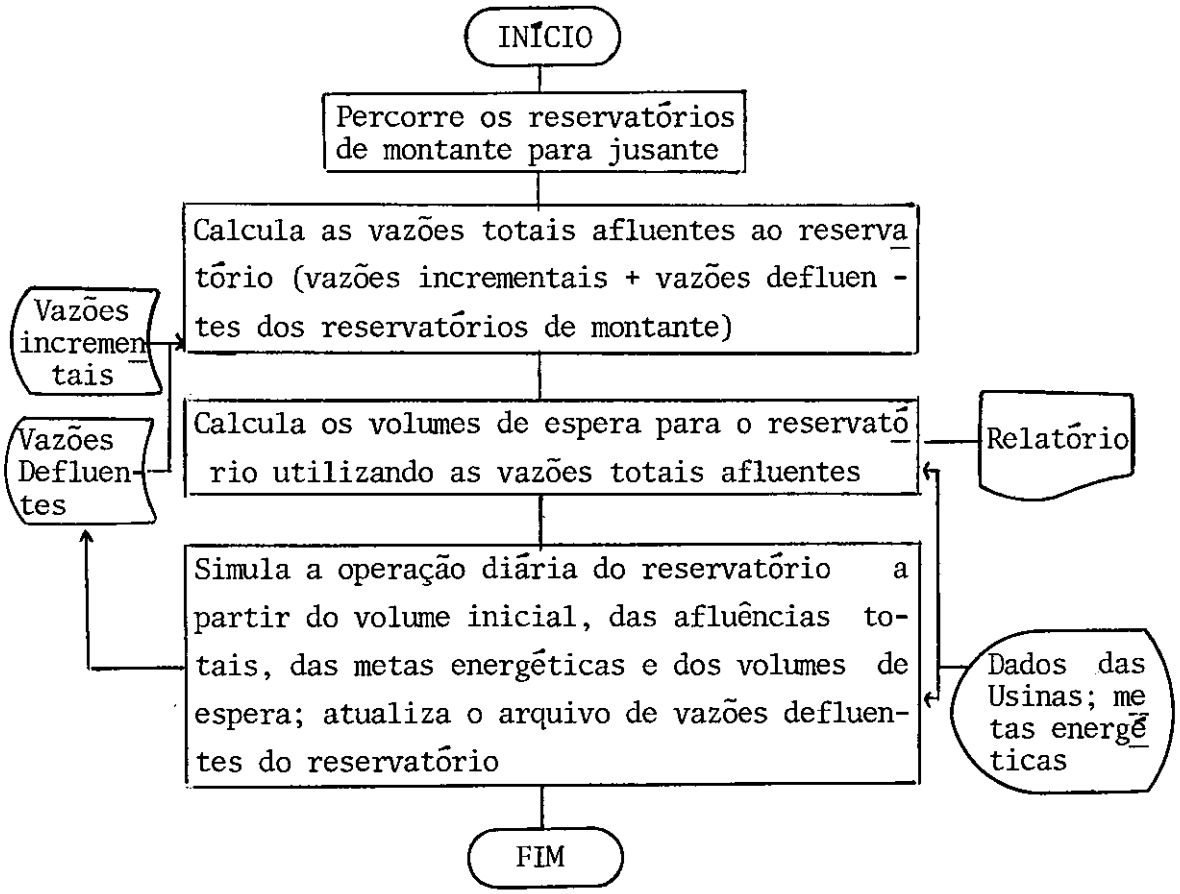


Figura IV.1 - Fluxograma da metodologia para Cálculo de volumes de espera num sistema de reservatórios

IV.2 Exemplo

Foram escolhidos os reservatórios de Furnas e Marimbondo (ver Tabela IV.1) localizados respectivamente no alto e baixo rio Grande como possíveis de atuarem no controle de enchentes.

USINAS	VOLUME TOTAL ($10^9 m^3$)	VOLUME ÚTIL ($10^9 m^3$)	ÁREA DE DRENAGEM (Km^2)	POTÊNCIA INSTALADA (Mw)	Ū VAZÃO DE RESTRIÇÃO (m^3/s)
FURNAS	22,950	17,217	52 300	1312	4000
MARIMBONDO	6,150	5,260	118 488	1488	7500

Tabela IV.1 - Dados de Furnas e Marimbondo

IV.2.1 Cálculo dos Volumes de Espera

A capacidade de amortecimento dos reservatórios existentes situados entre Furnas e Marimbondo foi desprezada, adotando-se como método de propagação das vazões apenas o defasamento de três dias. Este tempo corresponde ao tempo de viagem médio estimado a partir da série históricas de vazões diárias nos postos São José da Barra e Porto José Américo (Furnas e Marimbondo, respectivamente) com 26 anos de observação simultânea, entre os anos hidrológicos de 1935-1936 e 1960-1961 inclusive. Como regra de operação energética utilizou-se as médias das vazões mensais turbinadas em Furnas e Marimbondo durante o período chuvoso (1º de outubro a 30 de abril) nos anos de 1977 a 1980, apresentados na Tabela IV.2.

MÊS / USINA	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MÉDIA
FURNAS	1120	849	551	576	607	857	747	758
MARIMBONDO	1489	1488	1788	2011	1790	1777	1637	1711

Tabela IV.2 - Regra de Operação Energética (m^3/s)

O modelo proposto por Kelman |13| foi utilizado para gerar 10000 séries sintéticas bivariadas de vazões diárias afluentes a Furnas e incrementais para o trecho Furnas-Marimbondo. Os parâmetros do modelo foram ajustados a partir das séries históricas dos postos de São José da Barra e Porto José Américo acima mencionadas. As séries geradas (cada uma com 212 dias) possuem estrutura de correlação espacial e temporal.

IV.2.1.1 Método da Curva Volume Duração

As curvas volume-duração afluentes do reservatório de Marimbondo foram obtidas pelo ajuste de uma parábola do 2º grau às máximas vazões médias com duração 1,3,7,11,15,21 e 27 dias estimadas por interpolação na distribuição empírica das dez mil séries sintéticas de vazões diárias afluentes a Marimbondo. Estas séries foram obtidas simulando-se a operação do reservatório de Furnas, imaginando-se que no dia 1º de outubro o volume livre fosse igual ao volume de espera para ele recomendado (ver

Tabela II.2). A Tabela IV.3 apresenta os volumes de espera calculados para o reservatório de Marimbondo. Ressalte-se que os volumes de espera assim calculados levam em conta o amortecimento das cheias proporcionado pelo controle de Furnas.

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	VOLUME DE ESPERA km^3
25	0,187
50	0,588

Tabela IV.3 - Volumes de Espera para o Reservatório de Marimbondo ($\bar{u}_{Marimbondo} = 7500 m^3/s$)

IV.2.1.2 Método dos Volumes Críticos

A função risco meta adotada foi o abatimento do risco de operação energética, $\alpha_E(t)$. As curvas de risco de operação energética foram obtidas considerando-se as vazões totais afluentes a cada reservatório, conforme descrito no item III.3.1. A Figura IV.2 apresenta as funções $v_e(t)$ de cada reservatório para os períodos de retorno de 25 e 50 anos. Note-se (Tabela IV.4) que a média dos volumes alocados para o controle de cheias cresce à medida que o período de retorno para o evento emergência aumenta.

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	VOLUME DE ESPERA (km^3)	
	MÉDIO	MÁXIMO
25	0,122	0,292
50	0,362	0,702

Tabela IV.4 - Volumes de Espera para o Reservatório de Marimbondo ($\bar{u} = 7500\ m^3/s$)

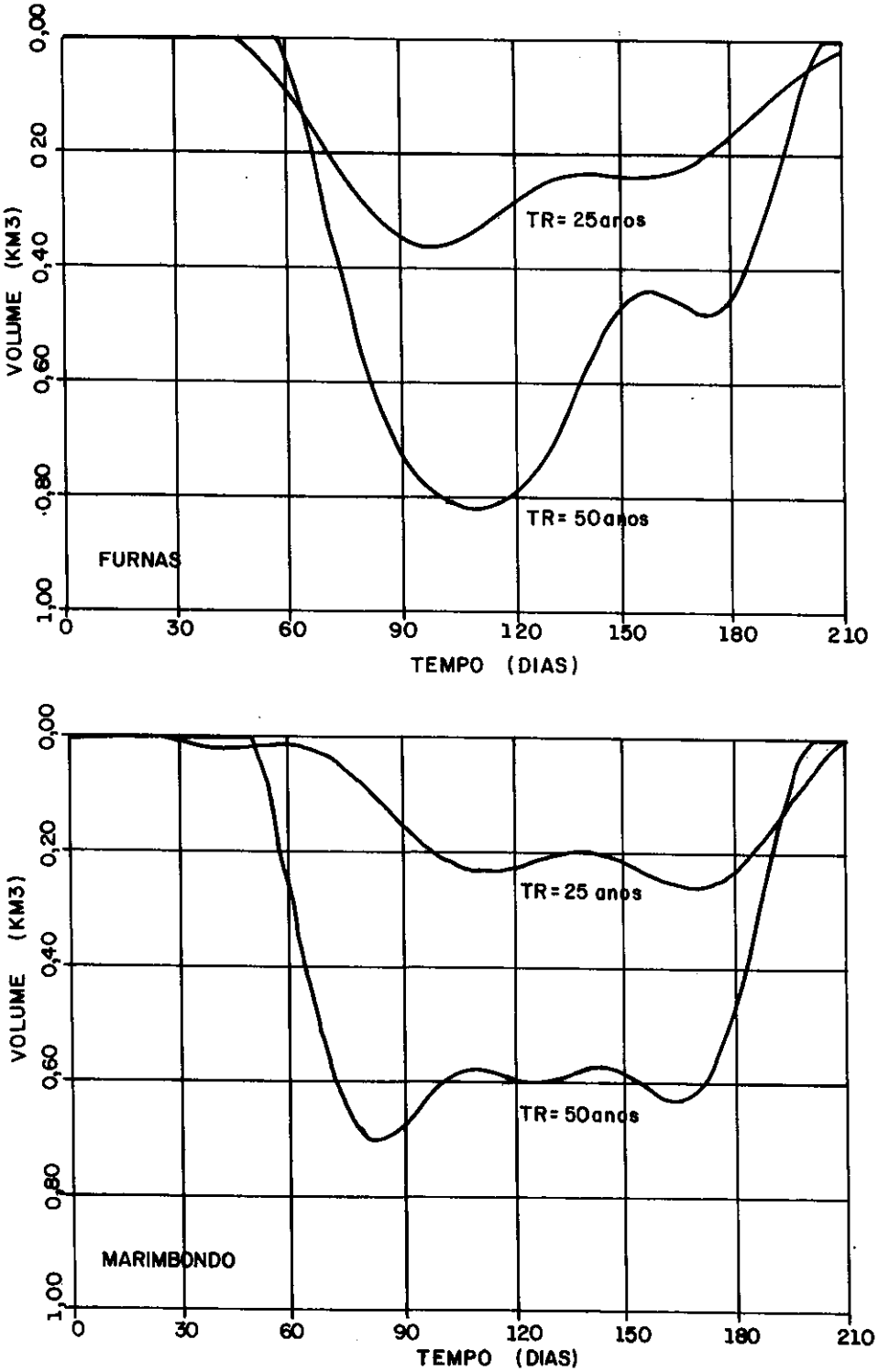


Figura IV.2 - Evolução de $v_e(t)$ para Furnas e Marimbondo para períodos de retorno de 25 e 50 anos ($\bar{u}_{Furnas} = 4000 m^3/s$)

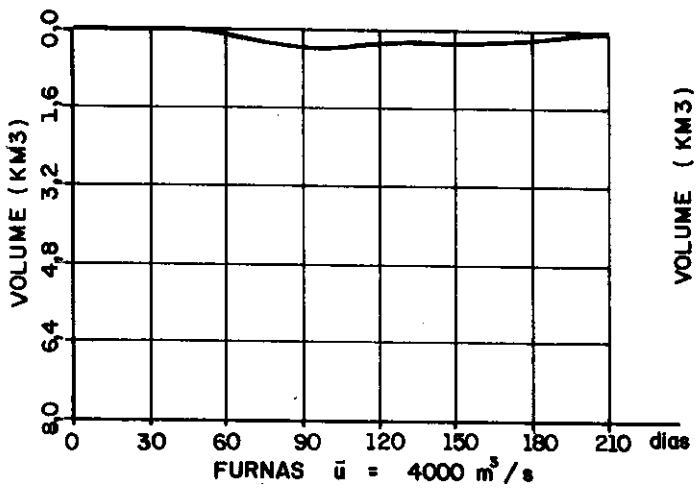
IV.3 Alocação Ótima dos Volumes de Espera

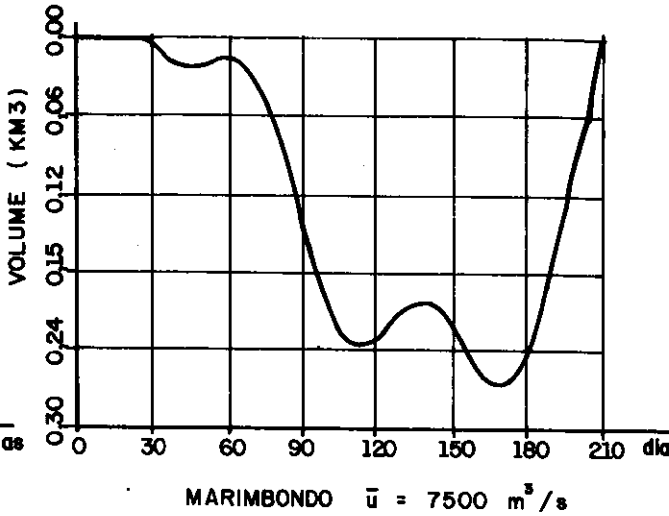
A metodologia acima exposta atribui volume de espera nulo para o i-ésimo reservatório da cascata se a sua vazão de restrição $\bar{u}_i$ for infinita, isto é, se não houver benfeitoria alguma a proteger entre os reservatórios i e (i + 1). Conseqüentemente, se a vazão $\bar{u}_{i+1}$ for limitada, a proteção do vale à jusante do reservatório (i + 1) fica unicamente dependente do volume de espera que se aloque para este reservatório.

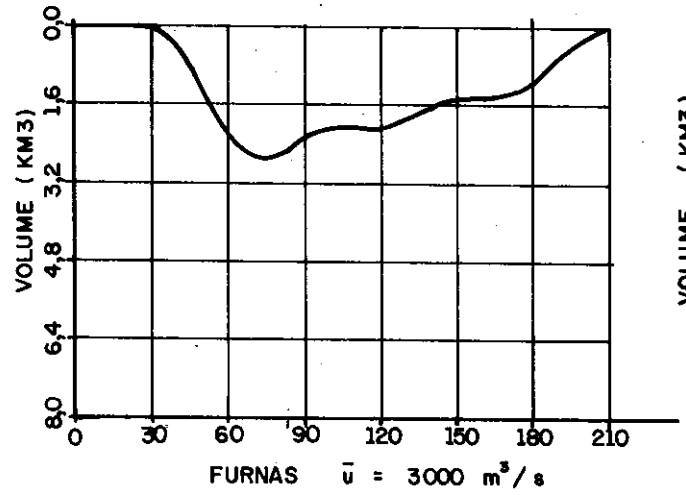
Entretanto, num sistema de reservatórios o controle de inundações ao longo da cascata pode ser feito de modo que todos os reservatórios compartilhem a responsabilidade de proteger o vale. Neste caso, o volume de espera alocado em cada reservatório deve ser calculado de maneira a proteger não apenas as benfeitorias situadas no trecho imediatamente à jusante da barragem mas também aquelas existentes até o final da cascata.

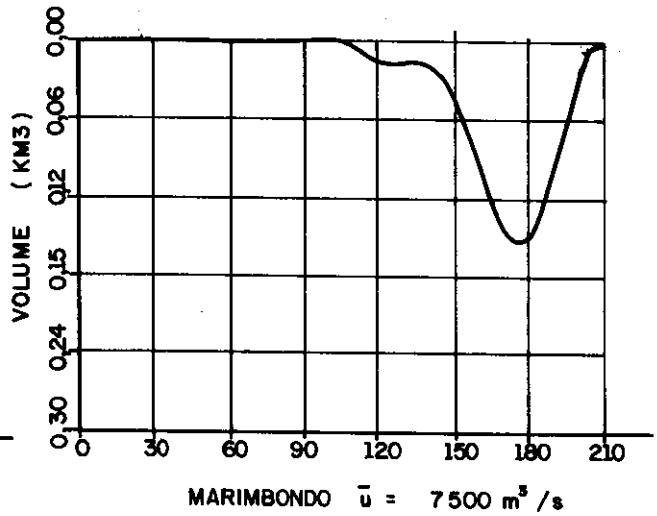
Uma possível maneira de resolver esta questão consiste em impor uma restrição fictícia ao reservatório de montante, u_i ($u_i \leq \bar{u}_i$) de maneira a auxiliar o controle exercido pelo reservatório de jusante. Note-se que esta restrição mais severa é apenas um meio indireto de aumentar o volume de espera alocado no reservatório de montante e não é necessária sob o ponto de vista de proteger apenas a área de inundação imediatamente à jusante de i.

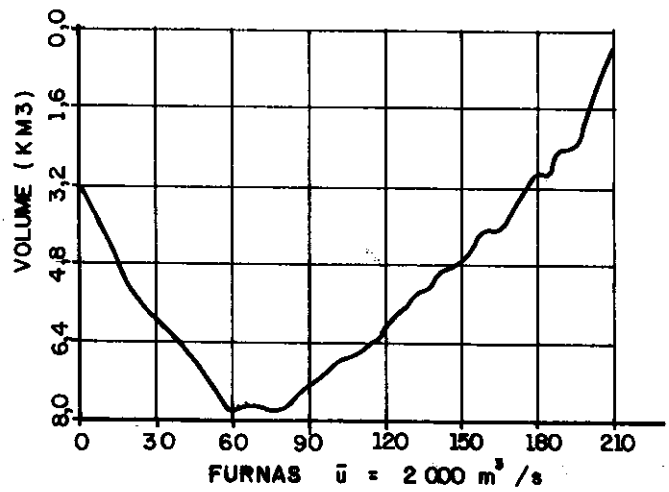
A mesma configuração descrita no item IV.2 foi utilizada para ilustrar este efeito. A Figura IV.3 mostra as evoluções dos volumes de espera de cada reservatório obtida pela metodologia dos volumes críticos para o período de retorno de 25 anos obtidas diminuindo-se a vazão de restrição do reservatório de montante (Furnas). Observa-se que, de fato, à medida que a vazão de restrição de montante se torna mais severa, o volume de espera requerido à jusante (Marimbondo) diminui. (ver Tabela IV.5).











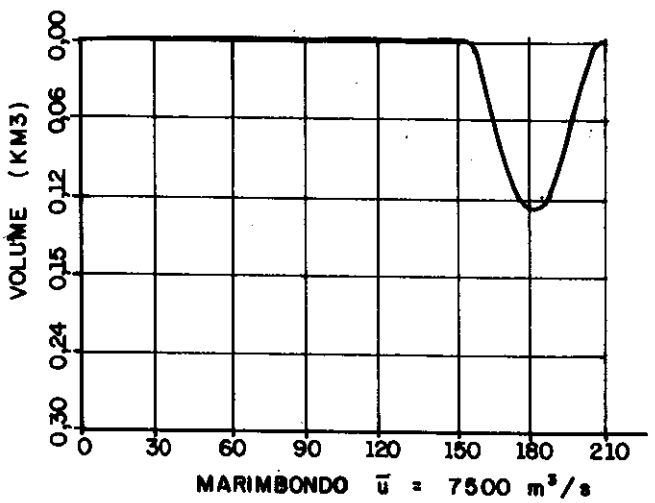


Figura IV.3 - Alternativas de alocação de volumes de espera no sistema Furnas-Marimbondo para o período de retorno de 25 anos

RESTRIÇÃO EM FURNAS (m^3/s)	VOLUMES DE ESPERA (km^3)			
	FURNAS		MARIMBONDO	
	MÉDIO	MÁXIMO	MÉDIO	MÁXIMO
4000	0,162	0,351	0,122	0,292
3000	1,330	2,735	0,030	0,156
2000	5,279	7,807	0,018	0,131

Tabela IV.5 - Volumes de Espera em Furnas e Marimbondo para o Período de Retorno de 25 anos e Restrições de Defluência em Marimbondo igual a 7500 m^3/s - (Método dos Volumes Críticos)

Comportamento semelhante se encontra quando o método da curva volume-duração é empregado, como ilustra a Tabela IV.6.

RESTRIÇÃO EM FURNAS (m^3/s)	VOLUMES DE ESPERA (km^3)	
	FURNAS	MARIMBONDO
4000	0,263	0,187
3000	1,843	0,005

Tabela IV.6 - Volumes de Espera em Furnas e Marimbondo Para o Período de Retorno de 25 anos e Restrições de Defluência em Marimbondo igual a 7500 m^3/s - (Método da Curva Volume-Duração)

Existem portanto diversos modos de alocar volumes de espera ao longo dos reservatórios de uma cascata proporcionando o mesmo nível de garantia contra inundações. A escolha entre as possíveis soluções viáveis pode ser feita estabelecen-

do-se um critério de minimização do "impacto energético" do controle de cheias sobre o sistema hidrotérmico.

IV.3.1 Quantificação do Impacto Energético

A incorporação de controle de cheias a um sistema hidrotérmico tem conseqüências a longo e curto prazo. A longo prazo, acarreta uma antecipação no cronograma de implantação de novas unidades para compensar a diminuição da produção média de energia nos reservatórios parcialmente utilizados para controle de cheias. Esta conseqüência tem repercussão inclusive no processo de planejamento da expansão do sistema. A curto prazo, a alocação de volumes de espera nos reservatórios aumenta a expectativa de geração de energia elétrica nas usinas térmicas e portanto de gasto com combustível (Kelman, |1|). No presente trabalho, apenas o efeito de curto prazo será utilizado para avaliar o impacto energético.

O impacto energético a curto prazo causado pela imposição de controle de cheias nos reservatórios pode ser avaliado através do custo de operação do sistema hidrotérmico. Este custo é composto de duas parcelas : o custo de operação térmica, associado ao consumo de combustível em cada unidade (nuclear, carvão, diesel, etc.) e o custo do deficit, que corresponde ao custo social de interrupção do fornecimento de energia.

A política ótima de operação térmica obtida por recursão de programação dinâmica estocástica (Terry, |17|) fornece a cada mês a complementação térmica adequada para atendimento do mercado bem como o valor esperado do custo futuro de operação a ela associado. A operação ótima do sistema no período é aquela que minimiza o custo de operação energética - soma do custo de operação durante o período chuvoso com o valor esperado do custo futuro de produção. O custo de operação do sistema é função que decresce com o aumento da energia armazenada no sistema (ver Apêndice): se os níveis dos reservatórios estão elevados, procura-se deplecioná-los para evitar vertimentos (que significam energia perdida pelo sistema) e postegar a geração térmica enquanto que se os níveis estão baixos procura-

-se operar as térmicas economizando energia hidráulica para assegurar o atendimento de carga futuro. Analogamente, quanto maior a energia armazenada menor a expectativa de geração térmica e portanto menor o valor esperado do custo futuro de produção.

IV.3.2 Minimização do Impacto Energético

A imposição de volumes de espera aos reservatórios representa uma limitação ao volume máximo armazenável. Portanto, o controle de cheias reduz a energia armazenada no sistema durante o período chuvoso e, prejudicando eventualmente o enchimento dos reservatórios ao final do período chuvoso, afeta sua capacidade de produção futura (representada pelo valor esperado do custo futuro de operação). A variação no custo de operação durante o período chuvoso causada pelo controle de cheias pode ser considerada nula : para séries de afluências que não alcançam a limitação de volume armazenado (afluências baixas) este controle não atua e, quando ocorrem séries de afluências tais que os volumes armazenados ficam limitados pelos volumes de espera prescritos (afluências altas) a capacidade instalada de geração hidrelétrica no sistema é tal que as defluências necessárias para manter esses volumes de espera são preferencialmente turbinadas, evitando-se a entrada em operação de térmicas adicionais no período chuvoso. Minimizar o impacto energético que o controle de cheias causa no sistema hidrotérmico consiste, pois, em minimizar o custo adicional devido somente a variação no valor esperado do custo futuro de operação. Como a energia armazenada no sistema é uma função monótona que decresce com o aumento do valor esperado do custo futuro de operação , neste trabalho esta minimização é feita de forma a maximizar a energia armazenada no final do período chuvoso.

Em vista das idéias acima expostas, minimizar o impacto energético pode ser formulado da seguinte maneira : sejam n o número de reservatórios do sistema e m o número de reservatórios que atuarão no controle de enchentes. Encontre $\underset{\sim}{u}^* = (u_1^*, u_2^*, \ldots, u_m^*)$, vetor de restrições fictícias tal que maximize o valor esperado da energia armazenada ao final do pe

ríodo chuvoso, não violando as restrições reais $\bar{u}_i$, i = 1,2,...,m. Isto é:

$$\max_{\underset{\sim}{u}} g(\underset{\sim}{u}) = E\,[EA\,(v_1\,(\underset{\sim}{u}),\ v_2(\underset{\sim}{u}),\ \ldots\ v_n(\underset{\sim}{u}))] \qquad \text{(IV.1)}$$

sujeito a

$$u_i \leq \bar{u}_i \qquad i = 1,2,\ldots,m$$

onde

$\underset{\sim}{u} = (u_1, u_2, \ldots, u_m)$ é o vetor de restrições fictícias para os m reservatórios

$\underset{\sim}{\bar{u}} = (\bar{u}_1, \bar{u}_2, \ldots, \bar{u}_m)$ é o vetor de restrições reais para os m reservatórios. Se não existe restrição para o i-ésimo reservatório, $\bar{u}_i \to \infty$

$v_i(\cdot)$ é o volume armazenado no reservatório ao final do período chuvoso

$EA(\cdot)$ é a energia armazenada no sistema

$E(\cdot)$ é o operador valor esperado.

Entretanto, não se dispõe de uma expressão analítica para a função objetivo pois, como foi visto, a determinação do volume de espera no reservatório j depende da distribuição das vazões a ele afluentes que só podem ser obtidas simulando-se os reservatórios imediatamente à montante de j. A solução através de métodos de tentativa e erro demanda um esforço computacional muito grande, como ilustra o exemplo a seguir.

IV.3.3 Aplicação

Considerando um sistema de reservatórios formado apenas por Furnas e Marimbomdo (ver item IV.2 para descrição de suas características) a metodologia acima exposta foi aplicada para se determinar a vazão de restrição fictícia em Furnas de forma a maximizar o valor esperado da energia armazenada no final do período chuvoso usando o método dos volumes críticos para o cálculo dos volumes de espera.

A figura IV.4 apresenta o gráfico do valor esperado

da energia armazenada ao final do período chuvoso em função da vazão de restrição em Furnas, u_1, quando a vazão de restrição em Marimbondo ($\bar{u}_2$) é igual a 7500 m^3/s. Para u_1 variando entre 2000 m^3/s e 5000 m^3/s (embora a vazão de restrição real em Furnas seja 4000 m^3/s) o valor da função objetivo varia entre 10196 MW mês e 11905 MW mês, observando-se diferenças significativas quando $u_1 < 3000$ m^3/s. No caso real, o valor ótimo da função objetivo ocorre quando a vazão de restrição fictícia coincide com a vazão de restrição real e é igual a 11812 MW mês. Note-se que caso não houvesse restrição alguma tanto em Furnas quanto em Marimbondo (isto é, $\bar{u}_1$ e $\bar{u}_2 \to \infty$) o valor da função objetivo seria de 12134 MW mês.

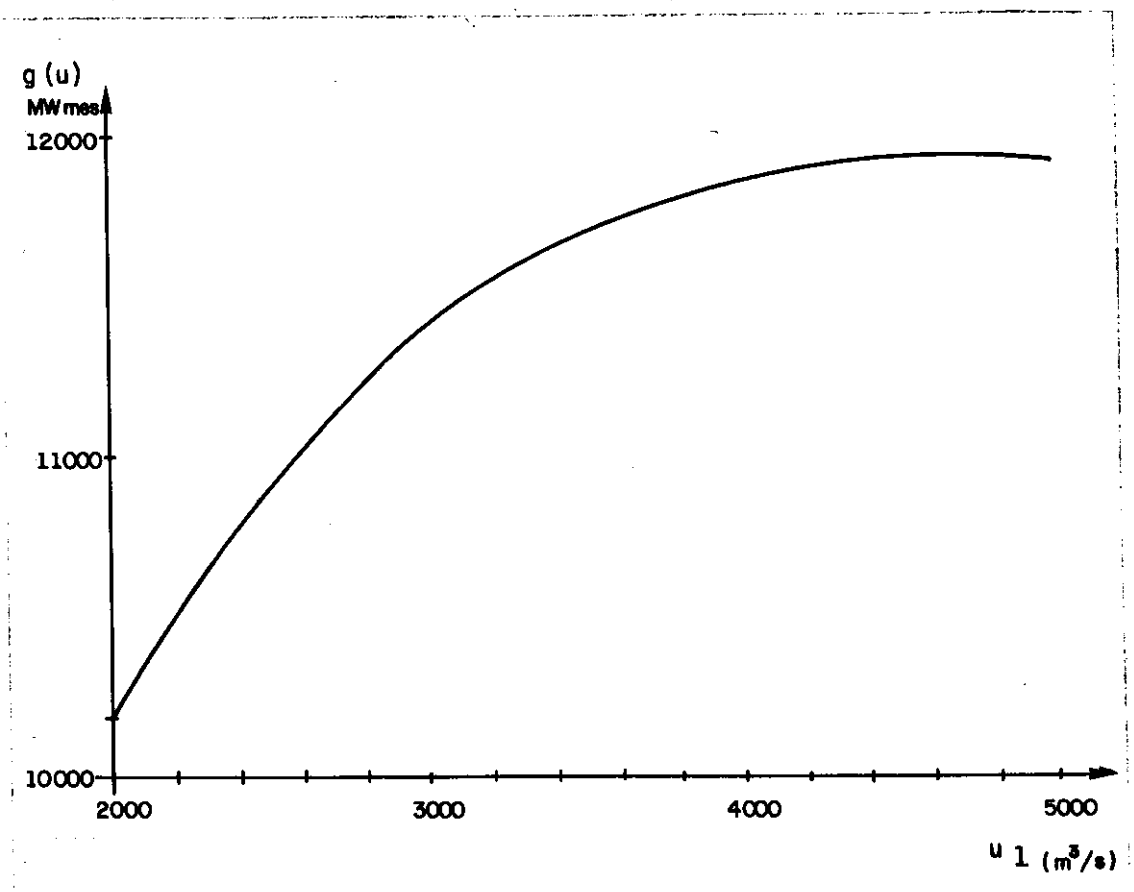


Figura IV.4 - Valor esperado da energia armazenada $g(\underset{\sim}{u})$ em função da vazão de restrição em Furnas, u_1

A curva acima referida foi levantada a partir de vários u_1 arbitrados. Uma vez fixado u_1, utilizando-se dez mil séries sintéticas de vazões afluentes a cada um dos reservatórios e intervalo de discretização igual a quatro dias, o tempo de CPU necessário para se obter o valor da função objetivo é cerca de 4 minutos (VAX-11/780). Considerando que este tempo cresce linearmente com o número de reservatórios, a pesquisa do ótimo em um sistema composto de 10 reservatórios se torna inviável.

Cabe observar que este problema também ocorre no método da curva volume-duração. Neste método, a parte computacionalmente mais pesada consiste na simulação da operação do reservatório de montante e na obtenção, para cada duração, da máxima vazão média afluente ao reservatório de jusante para cada série.

IV.4 Método Expedito

Em vista das dificuldades apontadas no item anterior, algumas simplificações podem ser feitas no sentido de viabilizar um cálculo aproximado da alocação ótima dos volumes de espera numa cascata de reservatórios a partir do método da curva volume-duração. A essência desta simplificação consiste em obter a curva volume-duração afluente a cada reservatório sem simular a operação dos reservatórios imediatamente à montante.

Descreve-se a seguir os métodos pesquisados para obter esta aproximação. Para avaliar o desempenho dos métodos considerou-se o sistema formado apenas pelos reservatórios de Furnas e Marimbondo, descrito no item IV.2. Os volumes de espera calculados pelos diversos métodos foram comparados com aqueles fornecidos pelas curvas volume-duração obtidas a partir da simulação do reservatório de montante, isto é, fornecidos pelas curvas volume-duração "corretas".

IV.4.1 Obtenção das Curvas Volume-Duração Aproximadas

IV.4.1.1 Método 1

Para um dado período de retorno, as curvas volume-duração afluentes no reservatório situam-se entre dois limites:

a) Limite superior : corresponde ao caso em que não há controle algum a montante. Portanto, a vazão que chega ao reservatório é igual à natural total e a curva volume-duração é $a_N t^2 + b_N t$.

b) Limite inferior : não há vazão defluente do reservatório de montante. Portanto, a vazão que chega à jusante é igual à incremental no trecho considerado, $a_I t^2 + b_I t$.

Para os casos intermediários, pretende-se obter a curva volume-duração afluente ao reservatório 2, de jusante, em função da vazão de restrição u_1 do reservatório 1, de montante.

Note-se que o volume de espera v_e é dado por (ver item II.2)

$$v_e = \max_t \{va\ (t) - t\ \bar{u}\} \qquad (IV.2)$$

onde $\bar{u}$ é a vazão de restrição e $va\ (t) = at^2 + bt$ é a curva volume-duração afluente ao reservatório. Portanto

$$v_e = -\frac{-\ (\bar{u} - b)^2}{4a} \qquad (IV.3)$$

Isto posto, o limite superior acima referido corresponde ao caso em que o volume de espera no reservatório 1 é igual a zero. Em outras palavras, para $u_1 = b_1$, a curva volume-duração afluente ao reservatório 2 é $a_{N2}\ t + b_{N2} t$.

Por outro lado, o limite inferior corresponde ao caso

em que o volume de espera no reservatório 1 é maximo, isto é, $u_1 = 0$. Portanto, a curva volume-duração afluente ao reservatório 2 é $a_I\ t^2 + b_I\ t$.

O método 1 consiste em obter diretamente a curva volume-duração afluente do reservatório de jusante como uma interpolação linear entre os dois limites estabelecidos em função da vazão de restrição u_1 : seja $\lambda = u_1/b_1$. A curva volume-duração afluente a 2 é dada por $va(t) = a_2^*\ t^2 + b_2^* t$

onde

$$a_2^* = \lambda(a_{N_2} - a_I) + a_I$$

$$b_2^* = \lambda(b_{N_2} - b_I) + b_I \qquad \text{(IV.4)}$$

A figura IV.5 ilustra este procedimento.

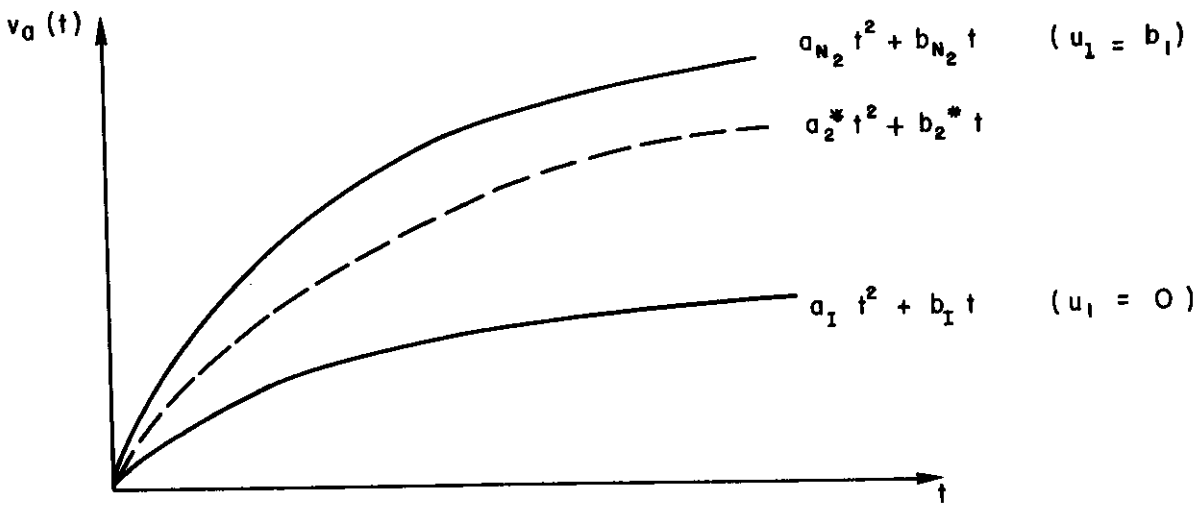


Figura IV.5 - Curva volume-duração afluente ao reservatório de jusante (método 1)

A figura IV.6 compara os resultados obtidos por este método com aqueles obtidos por simulação do reservatório de montante para os períodos de retorno de 25 e 50 anos e diversas vazões de restrição, tanto à montante quanto à jusante . Observa-se que os volumes de espera obtidos por este método são sempre subestimados.

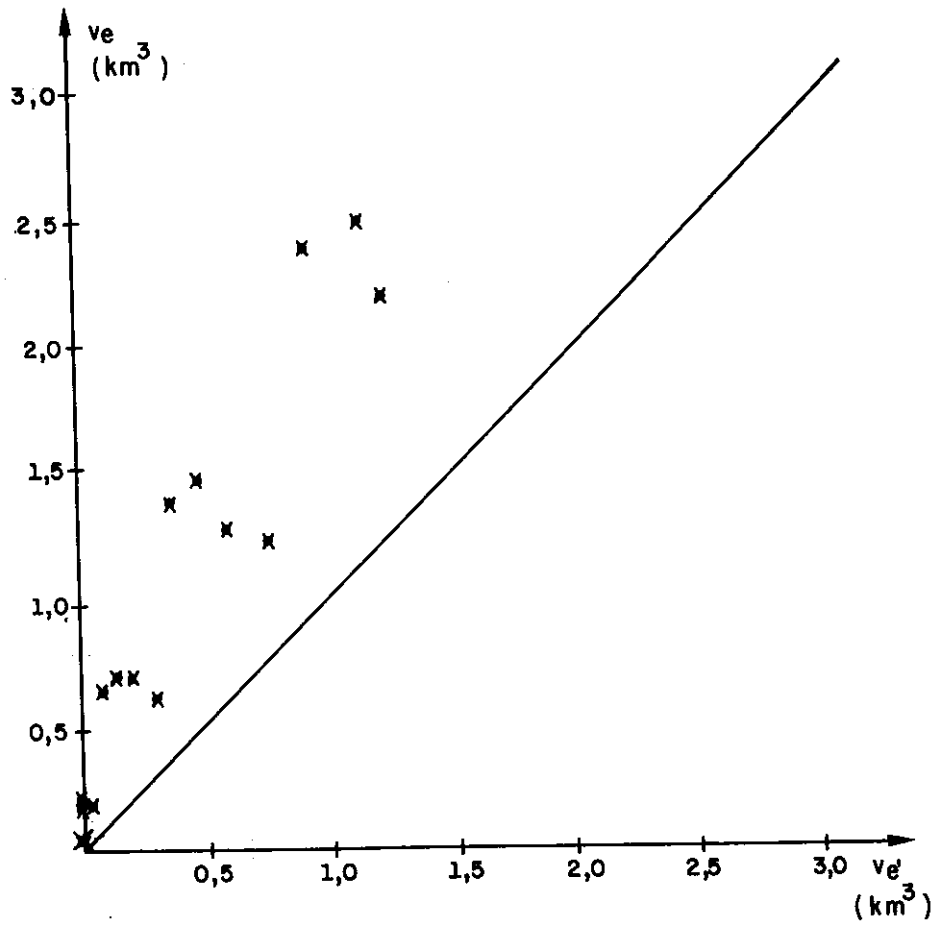


Figura IV.6 - Volumes de espera calculados

v_e : simulando a operação do reservatório de montante

v_e' ; método 1

IV.4.1.2 Método 2

Neste método, supõe-se que a curva volume-duração afluente ao reservatório de jusante seja igual à soma da curva volume-duração devido apenas à vazão incremental natural ($a_I t^2 + b_I t$) com a curva volume-duração defluente do reservatório de montante. Esta curva é obtida simplificadamente imaginando-se que esteja afluindo ao reservatório de montante exatamente a "hidrógrafa" associada à curva volume-duração $a_1 t^2 + b_1 t$ e que o volume de espera v_{e_1} esteja disponível no início da simulação. Nestas condições, o volume defluente é igual a $u_1 t$ enquanto $t \leq (u_1 - b_1)/a_1$ é igual a $a_1 t^2 + b_1 t$ para $t_1 \geq (u_1 - b_1)/a_1$. A figura IV.7 ilustra.

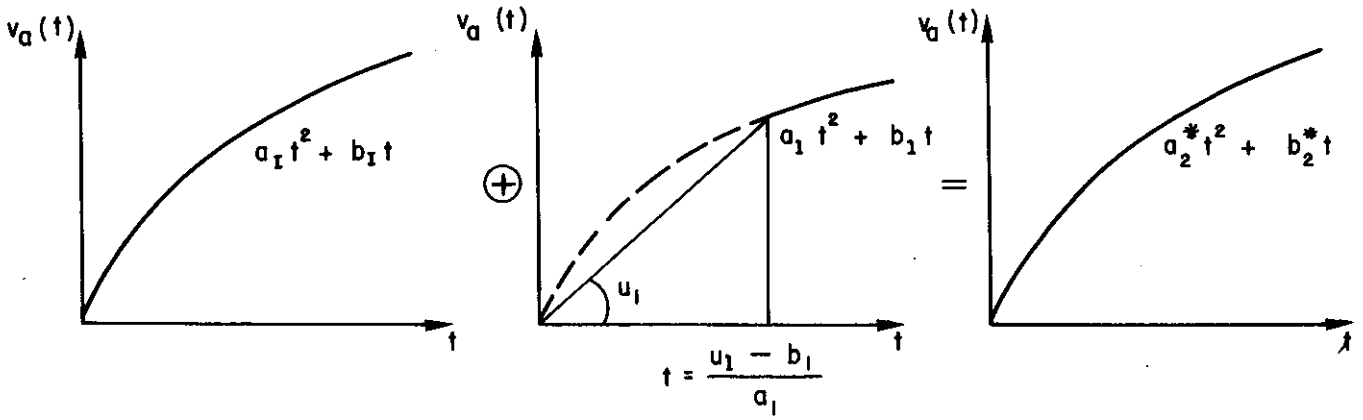


Figura IV.7 - Curva volume-duração afluente ao reservatório de jusante (método 2)

A expressão analítica para a curva volume-duração afluente ao reservatório de jusante, $a_2^* t^2 + b_2^* t$ fica:

$$a^*_2 = \begin{cases} a_I & t \leq (u_1 - b_1)/a_1 \\ a_I + a_1 & t > (u_1 - b_1)/a_1 \end{cases}$$

$$b^*_2 = \begin{cases} b_I + u_1 & t \leq (u_1 - b_1)/a_1 \\ b_I + b_1 & t > (u_1 - b_1)/a_1 \end{cases} \qquad \text{(IV.5)}$$

A figura IV.8 apresenta os resultados obtidos, para os mesmos casos considerados no método 1. Nota-se que os volumes de espera obtidos pelo método 2 são sempre superestimados, sendo inclusive maiores que aqueles obtidos usando $a_{N2}t^2 + b_{N2}t$, isto é, admitindo que não há controle algum à montante.

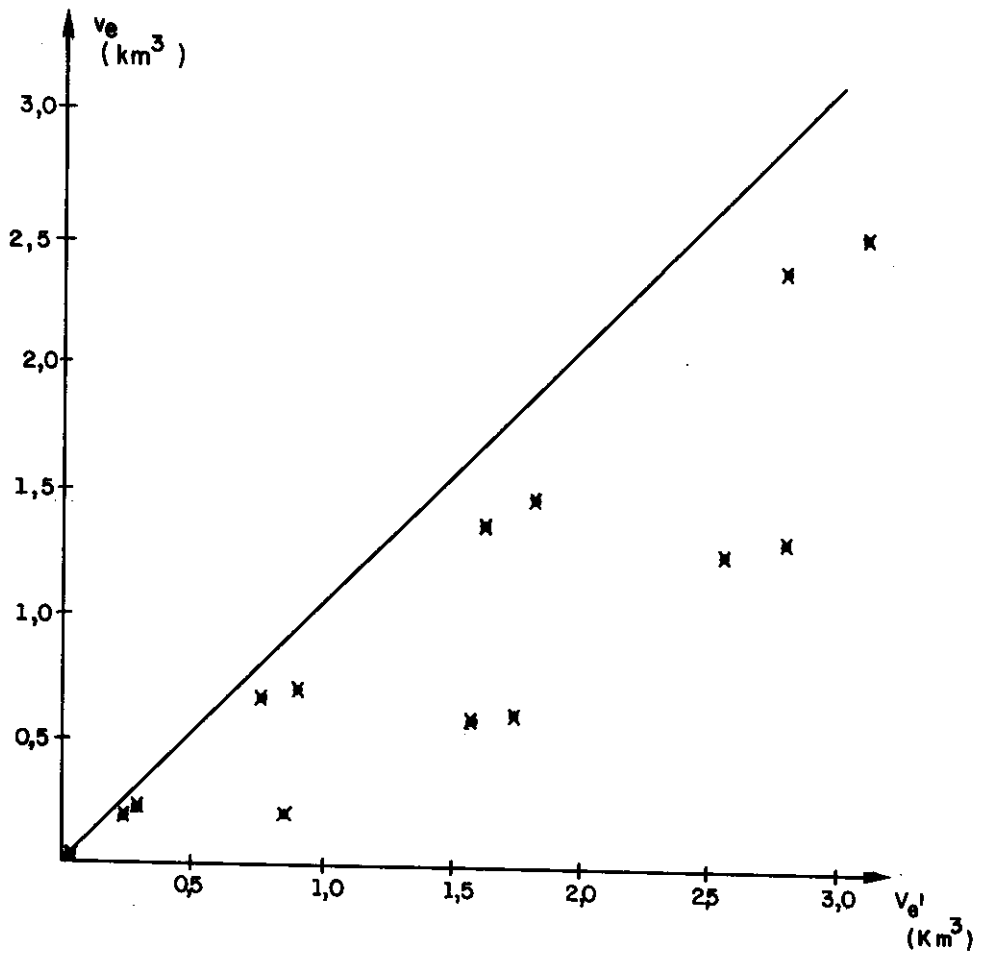


Figura IV.8 - Volumes de espera calculados

v_e : simulando a operação do reservatório de montante

v'_e : método 2

IV.4.1.3 Método 3

Este método é, em tudo, semelhante ao método 2 exceto que $a_I t^2 + b_I t$ é substituida por $(a_{N2} - a_1)t^2 + (b_{N2} - b_1)t$. A justificativa para esta substituição é que se $u_1 = b_1$, a curva volume-duração afluente ao reservatório de jusante fica exatamente igual à $a_{N2}t^2 + b_{N2}t$, o que não ocorre no método 2.

Os resultados obtidos estão na figura IV.9. Observa-se que neste caso os volumes de espera são, quase sempre, subestimados.

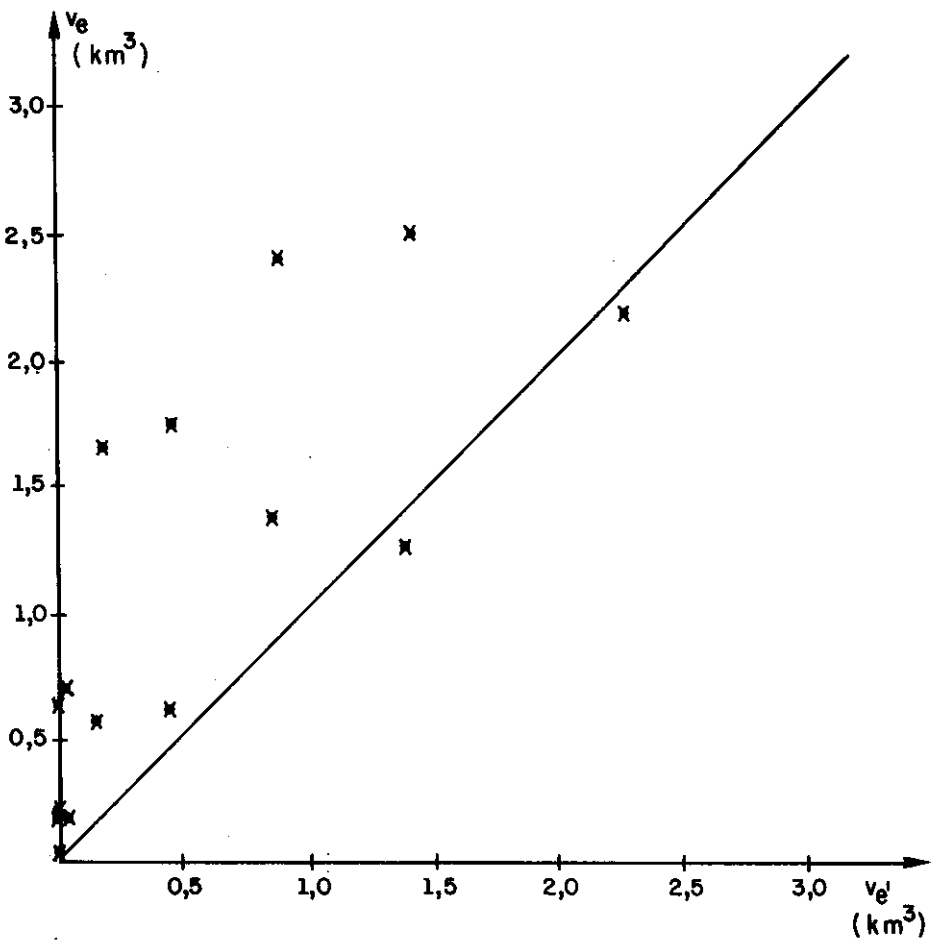


Figura IV.9 - Volumes de espera calculados

v_e : simulando a operação do reservatório de montante

v_e' : método 3

IV.4.1.4 Método 4

Este método consiste numa combinação entre os métodos 2 e 3 acima expostos. O método 2 é "exato" enquanto o volume defluente do reservatório de montante for tal que a reta $u_1 t$ não intercepte a curva volume-duração afluente ao reservatório de montante. Em outras palavras, enquanto o controle exercido à montante for tal que durante toda a estação de cheias a vazão defluente do reservatório é mantida igual a um certo valor mínimo $\underline{u}_1$ (ver figura IV.10.a). Observe-se que, neste caso, no início da estação seca o volume livre no reservatório 1 é igual ao volume de espera recomendado para $u_1 = \underline{u}_1$.

Por outro lado, o método 3 é "exato" no caso da vazão de restrição u_1 ser maior do que ou igual a b_1. Isto é, enquanto o reservatório de montante não opera para controle de cheias, o volume total afluente ao reservatório de jusante é igual ao volume total natural (ver figura IV.10.b).

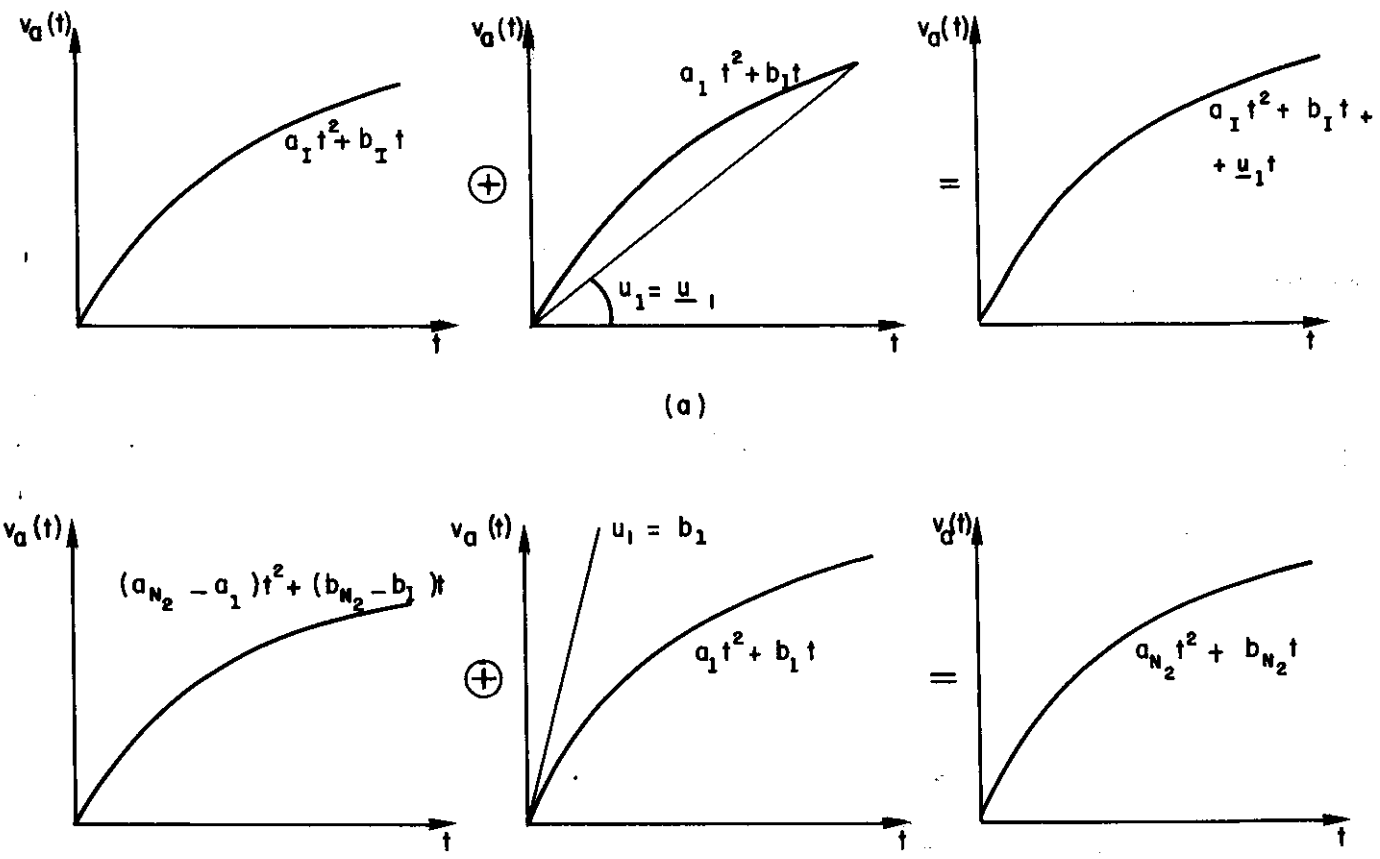


Figura IV.10 - Curvas volume-duração afluentes ao reservatório de jusante (método 4)

A curva volume-duração afluente ao reservatório de jusante para valores de $u_1 \in [\underline{u}_1, b_1]$ pode ser obtida, ao invés de se interpolar entre as curvas totais afluentes ao reservatório 2 (equivalente ao método 1) como $a_2^* t^2 + b_2^* t$, onde

$$a_2^* = \lambda \left[(a_{N2} - a_1) - a_I\right] + a_I$$

$$b_2^* = \lambda \left[(b_{N2} - b_1) - b_I\right] + b_I + u_1 \qquad \text{(IV.6)}$$

sendo

$$\lambda = (u_1 - \underline{u}_1) \; / \; (b_1 - \underline{u}_1)$$

Sabe-se que a curva volume-duração é crescente com a duração (o volume total afluente em t+1 dias é maior que o volume total afluente em t dias), e tende para uma reta cuja declividade é conhecida : a vazão média do período chuvoso de período de retorno igual aquele considerado para obter a curva volume-duração. Este foi o valor considerado para $\underline{u}_1$ no caso exemplo, estimado a partir das séries geradas. A figura IV.11 apresenta os resultados obtidos. Observa-se que os volumes de espera calculados por este método situam-se em torno da reta de 45º, como requerido. Entretanto, a dispersão dos pontos em torno da reta esperada indica que os volumes de espera calculados pelo método 4 constituem apenas uma aproximação razoável para a ordem de grandeza de seus valores.

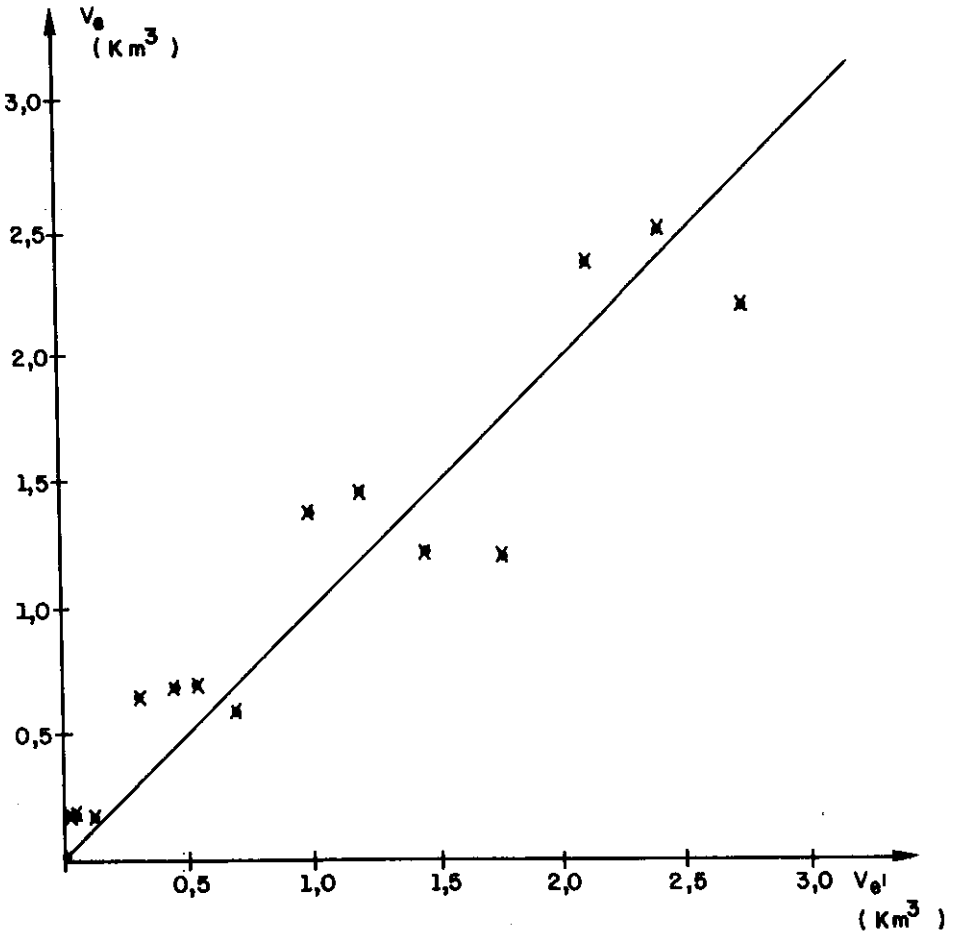


Figura IV.11 - Volume de espera calculados

v_e : simulando a operação do reservatório de montante

v'_e : método 4

Em vista dos resultados acima, adotou-se o método 4 para obtenção das curvas volume-duração afluentes ao reservatório de jusante sem simular a operação dos reservatórios imediatamente à montante.

A seguir, ilustra-se (figura IV.12) como generalizar este método para o caso de mais um reservatório à montante.

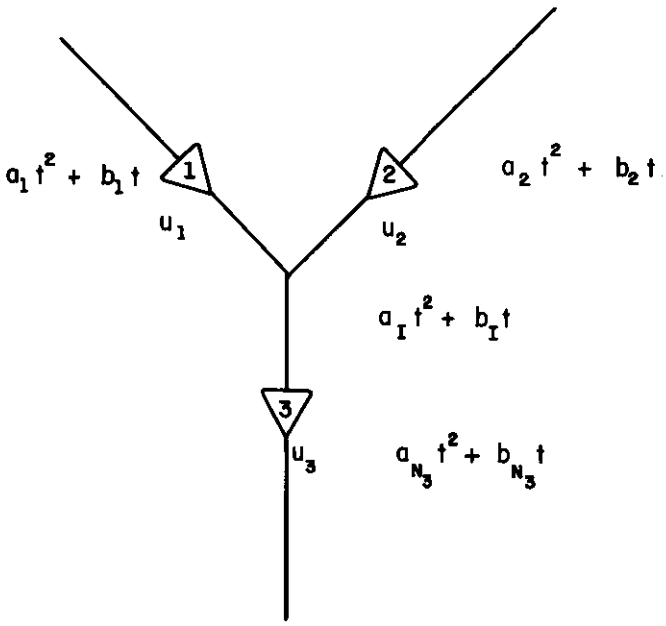


Figura IV.12 - Caso de dois reservatórios à montante

Neste caso, basta considerar como limite inferior para a máxima vazão defluente dos reservatórios de montante a soma $(b_1 + b_2)$ e como limite superior para o intervalo de interpolação a soma $(\underline{u}_1 + \underline{u}_2)$. Portanto, os coeficientes da parábola de segundo grau $a_3^* t + b_3^* t$ da curva volume-duração afluente ao reservatório 3 são dados por:

$$a_3^* = \lambda \left[(a_{N_3} - a_1 - a_2) - a_I\right] + a_I$$

$$b_3^* = \lambda \left[(b_{N_3} - b_1 - b_2) - b_I\right] + b_I + u_1 + u_2 \qquad \text{(IV.7)}$$

onde

$$\lambda = \frac{(u_1 + u_2) - (\underline{u}_1 + \underline{u}_2)}{(b_1 + b_2) - (\underline{u}_1 + \underline{u}_2)}$$

IV.4.2 Otimização

De acordo com o item IV.3 a alocação ótima dos volumes de espera é feita maximizando o valor esperado da energia armazenada no final do período chuvoso, em função dos volumes armazenados nos reservatórios do sistema neste instante. Segundo o método da curva volume-duração, o volume de espera em cada reservatório é constante para todo o período considerado. Como durante a estação chuvosa a tendência natural dos reservatórios é encher, quanto menores os volumes de espera recomendados maior o valor esperado dos volumes armazenados no sistema e, conseqüentemente, maior a energia armazenada. Portanto, prescindindo-se da simulação do sistema pode-se aproximar a alocação ótima dos volumes de espera ao longo da cascata por uma distribuição destes volumes tal que maximize a energia armazenada para o estado dos reservatórios igual a $(\bar{v}_i - v'_{ei})$ onde $\bar{v}_i$ é o volume máximo armazenável no i-ésimo reservatório, e v'_{ei} o volume de espera calculado pelo método 4 acima exposto. Nestas condições o problema pode ser formulado como (ver equação A-8 do Apêndice).

$$\max_{\underset{\sim}{u}} g(\underset{\sim}{u}) = c \sum_{i \in R} (\bar{v}_i - v'_{ei}(\underset{\sim}{u})) \int_0^1 \sum_{j \in J_i} \eta_j h_j(\xi_j \theta) d\theta \quad \text{(MW mês)} \qquad \text{(IV.8)}$$

sujeito a

$$0 \leq u_i \leq \bar{u}_i \qquad i = 1,2,\ldots,m$$

$$v'_{ei} \leq (v_{útil})_i \qquad i = 1,2,\ldots,m$$

onde

c $\quad 9{,}81 \times 10^{-3}/2{,}6298$

R $\quad$ conjunto de usinas com reservatório

J_i Conjunto de usinas em cascata a partir da usina de reservatório i, inclusive, até a última à jusante

η_j rendimento global do conjunto turbina-gerador

$h_i(\xi_i\theta)$ altura (m) de queda líquida do reservatório j expressa em função de ξ_i ou valor da altura líquida constante para usinas sem reservatórios

$\bar{v}_i$ máximo volume armazenável na usina i ($10^6 m^3$)

v'_{ei} volume de espera ($10^6 m^3$) na usina obtido pelo método de interpolação

$(v_{útil})_i$ volume útil ($10^6 m^3$) para o i-ésimo reservatório

As curvas h(·) que fornecem a altura de queda para um dado volume armazenado (chamadas curvas cota-volume) são em geral aproximadas por polinômios. Desta forma, $g(\underset{\sim}{u})$ se torna uma função não linear e sua maximização é um problema de programação não linear com m variáveis de decisão (u_i, i = 1,2,...,m) e 3m restrições lineares. O algoritmo adotado para a resolução deste problema baseia-se no método de gradientes projetados desenvolvido por Rosen em 1960 conforme apresentado em |18|.

Aplicando-se este método para o exemplo dos reservatórios de Furnas e Marimbondo, a alocação ótima (u_1^*, u_2^*) para $\bar{u}_1 = 4000 m^3/s$ e $\bar{u}_2 = 7500 m^3/s$ e período de retorno de 25 anos é $u_1^* = \bar{u}_1$ e $u_2^* = \bar{u}_2$ sendo que $g(\underset{\sim}{u}^*) = 11.966$ MW mês.

A figura IV.13 apresenta a evolução da energia armazenada neste sistema em função da vazão de restrição em Furnas para várias vazões de restrição fixas em Marimbondo e período de retorno de 25 e 50 anos. Observa-se que, de fato, a função tem um máximo global mas que, para as restrições reais ($u_1 = 4000 m^3/s$ e

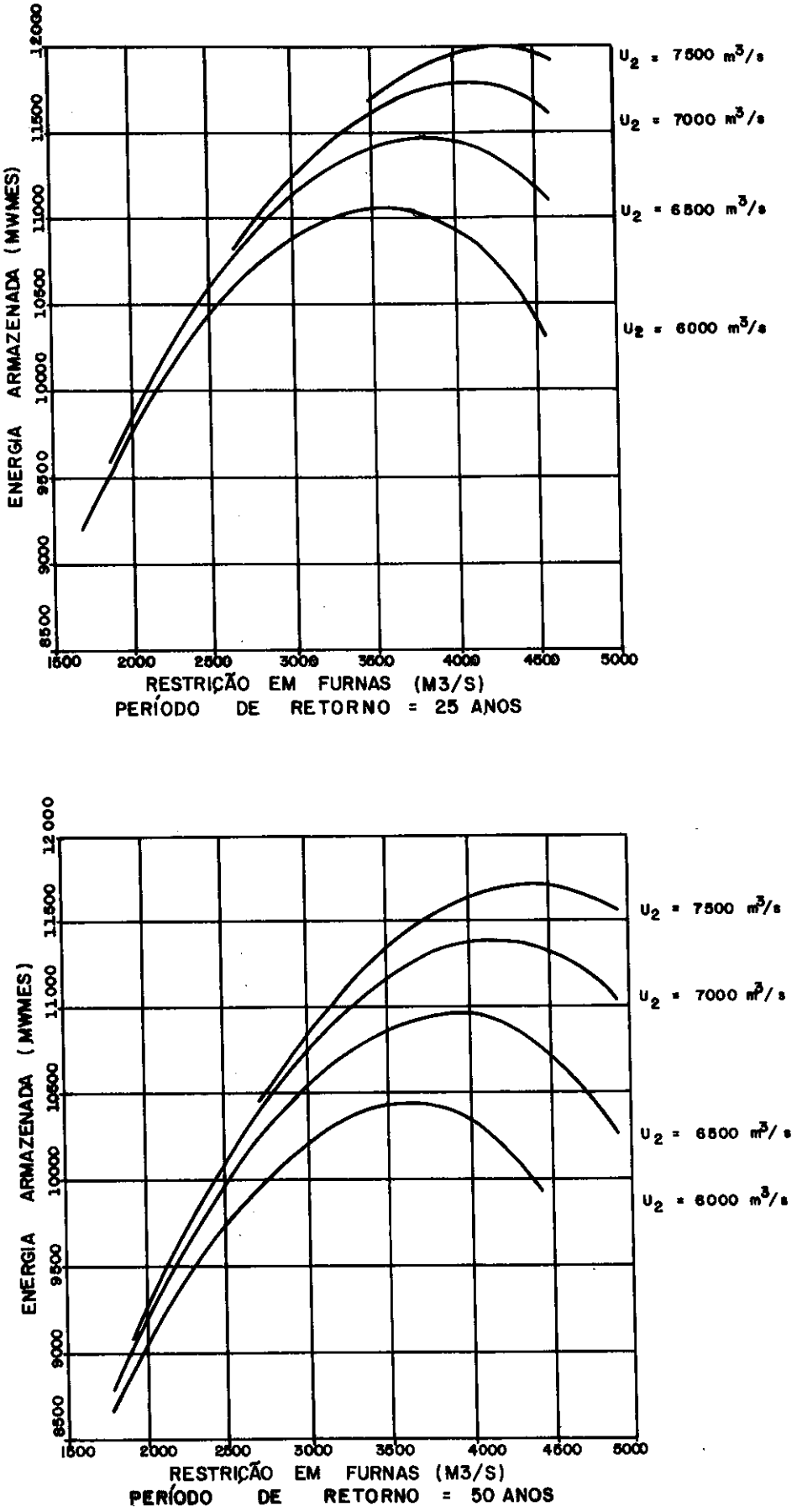


Figura IV.13 - Energia armazenada no sistema Furnas-Marimbondo

$\bar{u}_2$ = 7500 m^3/s) o máximo se encontra na fronteira da região viável.

Deve-se ressaltar, no entanto, que esta situação não ocorre para todos os casos pesquisados, como mostra a tabela IV.7. Por exemplo, caso $\bar{u}_2$ = 6500 m^3/s e α^{-1} = 25 anos o valor ótimo da restrição à montante ocorre para u_1^* = 3847 m^3/s.

PERÍODO DE RETORNO (ANOS)	u_1^* (m^3/s)	u_2 (m^3/s)	v_{e1} ($10^6 m^3$)	v_{e2} ($10^6 m^3$)	$g(\underset{\sim}{u})$ (MW mês)
25	4256	7500	88	273	12005
	4081	7000	198	801	11786
	3847	6500	412	1474	11470
	3613	6000	705	2317	11061
50	4349	7500	278	914	11711
	4156	7000	471	1680	11377
	3899	6500	804	2508	10951
	3642	6000	1228	3467	10433

Tabela IV.7 - Alocação Ótima de Volumes de Espera em Furnas e Marimbondo segundo o Método Expedito

IV.4.3 Aplicação

O método expedito acima exposto foi aplicado ao sistema de reservatórios dos rios Grande, Paranaíba e Paraná descrito na tabela IV.8 para o período de retorno de 25 anos. Deste sistema, os reservatórios que serão utilizados para alocar volumes de espera são : Furnas, Mascarenhas de Moraes, Marimbondo e Água Vermelha no rio Grande, Emborcação, Itumbiara e São Simão no rio Paranaíba e Ilha Solteira no rio Paraná (ver figura II.3).

Considerou-se que os volumes de espera alocados nos reservatórios do rio Tietê, não levado em conta explicitamente, são capazes de garantir a defluência máxima de 2300 m^3/s em Promissão. Somando-se a esta vazão o valor de 1604 m^3/s (correspondente ao valor de b/0,0864 da curva volume-duração referente à área incremental entre Jupiá e os reservatórios de Ilha Solteira e Promissão) pode-se transformar o problema de garantir a vazão de restrição em Jupiá no problema de garantir a vazão de restrição em Ilha Solteira atráves da equação

$$\bar{u}_{15} = \bar{u}_{16} - 2300 - 1604 \ (m^3/s) \qquad (IV.9)$$

ÍNDICE DA USINA	NOME	VOLUME ($10^6 m^3$)		$\bar{u}$ (m^3/s)	ÍNDICE DA USINA À JUSANTE	CONTRO LA CHEIAS
		MÁXIMO	MÍNIMO			
1	Camargos	729	120	∞	2	Não
2	Itutinga	12	12	∞	3	Não
3	Furnas	22950	5733	5000	4	Sim
4	Mascarenhas de Moraes	4040	1540	4400	5	Sim
5	Estreito	1340	1340	∞	6	Não
6	Jaguara	450	450	∞	7	Não
7	Volta Grande	2150	2150	∞	8	Não
8	Porto Colômbia	1450	1450	∞	9	Não
9	Marimbondo	6150	890	7500	10	Sim
10	Água Vermelha	11025	5856	∞	15	Sim
11	Emborcação	17636	4621	∞	12	Sim
12	Itumbiara	17027	3360	∞	13	Sim
13	Cachoeira Dourada	660	660	∞	14	Não
14	São Simão	12580	7000	∞	15	Sim
15	Ilha Solteira	21060	8232	∞	16	Sim
16	Jupiá	3680	3680	16000	0	Não

Tabela IV.8 - Dados do Sistema de Reservatórios

A figura IV.14 apresenta o esquema de interligação existente.

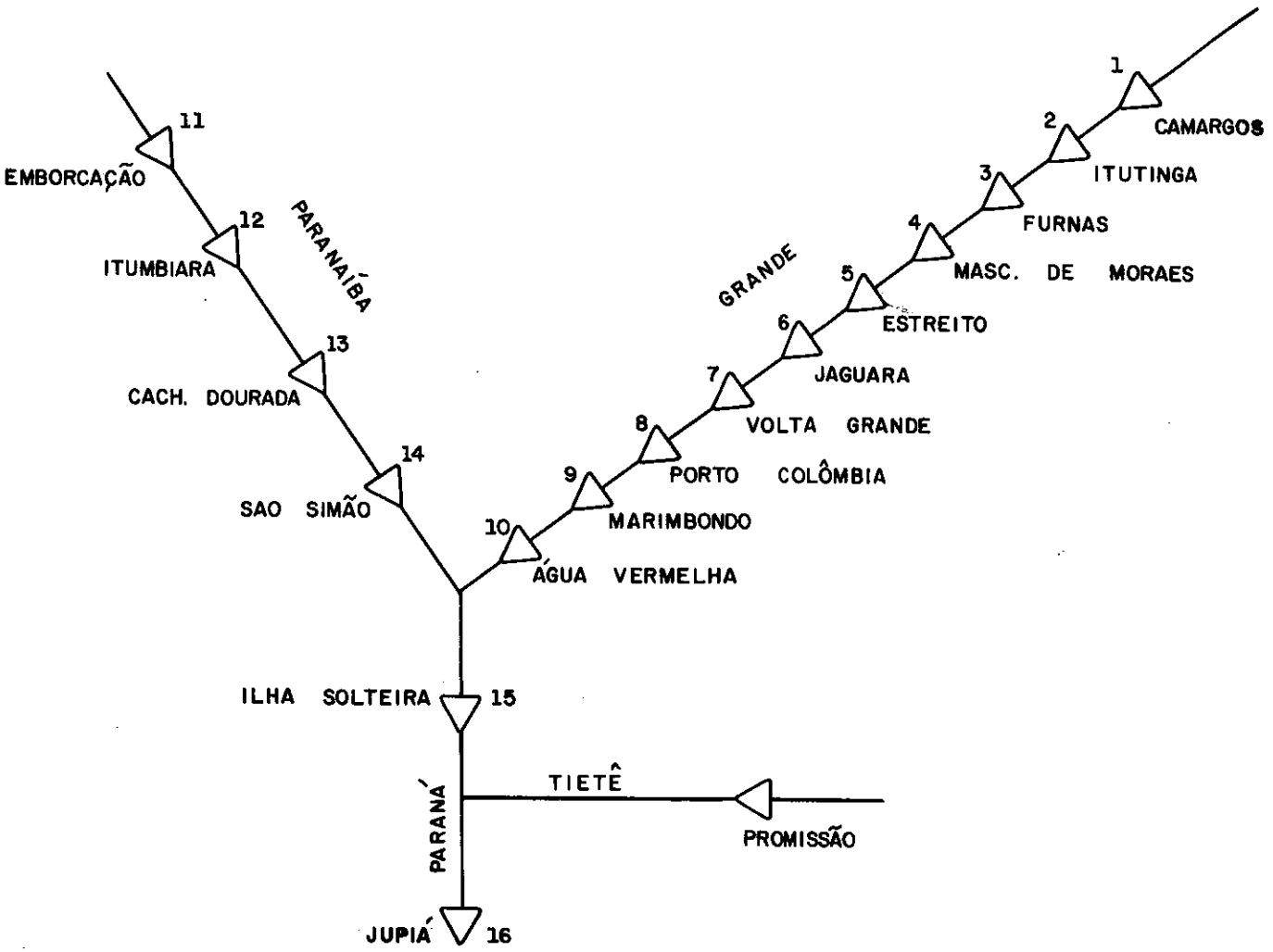


Figura IV.14 - Sistema de reservatórios

IV.4.3.1 Curvas Volume-Duração

As curvas volume-duração para o período de retorno de 25 anos foram obtidas a partir de dados fornecidos pelo DEOP/ ELETROBRÁS. Os coeficientes a e b das curvas para as vazões totais naturais e vazões incrementais naturais em cada aproveitamento selecionado para atuar no controle de cheias estão nas tabelas IV.9 e IV.10 respectivamente.

U S I N A	COEFICIENTES DA CURVA VOLUME-DURAÇÃO	
	a	b
FURNAS	- 3,888	422,8
MASCARENHAS DE MORAES	- 4,028	443,9
MARIMBONDO	- 4,812	723,3
ÁGUA VERMELHA	- 5,544	833,2
EMBORCAÇÃO	- 2,692	250,0
ITUMBIARA	- 9,427	777,0
SÃO SIMÃO	- 10,879	990,4
ILHA SOLTEIRA	- 9,123	1796,8

TABELA IV.9 - Curvas volume-duração para as vazões totais naturais (período de retorno de 25 anos) $va(t) = at^2 + bt$ ($10^6 m^3$, t em dias)

A curva volume-duração afluente ao reservatório de Água Vermelha foi obtida a partir da curva volume-duração afluente ao reservatório de Marimbondo, através da relação entre os volumes afluentes a cada posto e a respectiva área de drenagem:

$$\frac{V_{AV}}{V_M} = \left| \frac{A_{AV}}{A_M} \right|^{\alpha} \qquad \text{(IV.10)}$$

onde $\alpha = 0,78$ (valor obtido em |19| em estudos de regionalização para o reservatório de Três Marias).

U S I N A	COEFICIENTES DA CURVA VOLUME-DURAÇÃO	
	a	b
FURNAS	- 3,888	422,8
MASCARENHAS DE MORAES	- 0,894	73,7
MARIMBONDO	- 2,013	320,7
ÁGUA VERMELHA	- 0,726	102,4
EMBORCAÇÃO	- 2,692	250,0
ITUMBIARA	- 5,147	499,2
SÃO SIMÃO	- 3,958	316,5
ILHA SOLTEIRA	- 1,620	228,9

Tabela IV.10 - Curvas Volume-Duração para as vazões incrementais (período de retorno de 25 anos)
$va(t) = at^2 + bt$ ($10^6 m^3$, t em dias)

As curvas volume-duração incrementais para Água Vermelha e Ilha Solteira foram obtidas segundo um procedimento análogo ao acima descrito usando a equação IV.10.

Para aplicar-se o método 4 (item IV.4.1.4) é necessário se dispor das curvas volume-duração obtidas por subtração das naturais totais afluentes a cada reservatório. Estas curvas constam da tabela IV.11. Para as usinas de Água Vermelha, São Simão e Ilha Solteira esta subtração fornece valores inconsistentes. Neste caso, adotou-se os mesmos coeficientes das curvas incrementais naturais, constantes da tabela IV.10.

U S I N A	COEFICIENTES DA CURVA VOLUME-DURAÇÃO	
	a	b
MASCARENHAS DE MORAES	- 1,400	21,1
MARIMBONDO	- 0,784	279,4
SÃO SIMÃO	- 1,452	213,3

Tabela IV.11 - Curvas Volume-Duração obtidas por subtração (período de retorno de 25 anos) $va(t) = at^2 + bt$ ($10^6 m^3$, t em dias)

Segundo o item IV.4.1 os valores de $\underline{u}_i$ deveriam ser obtidos através de um estudo de freqüência de vazões médias para o período chuvoso. Não se dispondo destes estudos, adotou-se os valores constantes da tabela IV.12 obtidos dos coeficientes das curvas volume-duração naturais totais pela fórmula (ver figura IV.15).

$$\underline{u}_i = \frac{-b_{Ni}^2}{0,0864 \times 212 \times 4a_{Ni}} \quad m^3/s \qquad \text{(IV.11)}$$

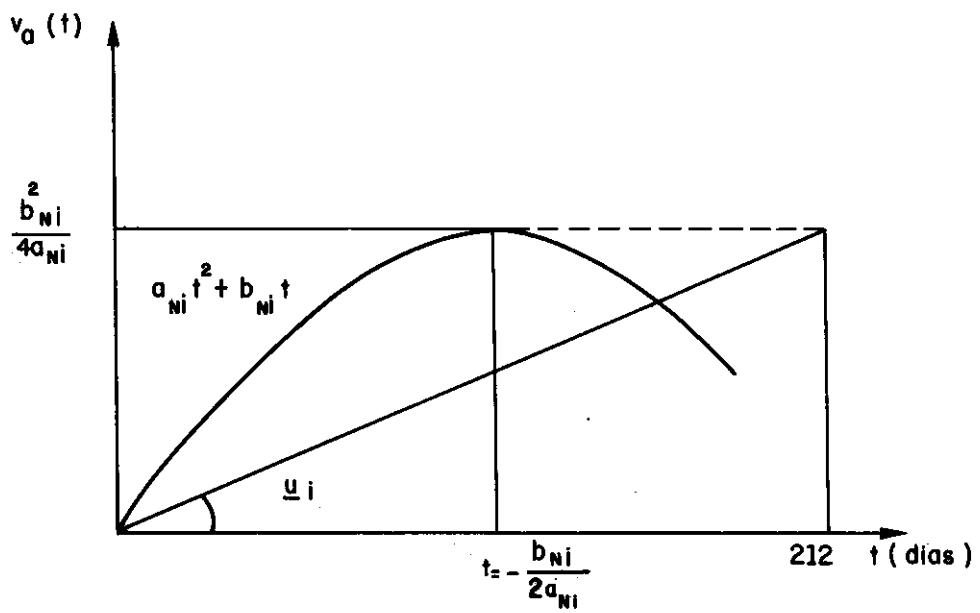


Figura IV.15 - Estimativa de $\underline{u}_i$

U S I N A	$\underline{u}_i$ (m^3/s)
FURNAS	628
MASCARENHAS DE MORAES	668
MARIMBONDO	1484
ÁGUA VERMELHA	1709
EMBORCAÇÃO	324
ITUMBIARA	874
SÃO SIMÃO	1230
ILHA SOLTEIRA	4830

Tabela IV.12 - Valores adotados para $\underline{u}_i$

IV.4.3.2 Resultados Obtidos

Foram consideradas três vazões de restrição para o reservatório de Jupiá : 16000 m^3/s, 17000 m^3/s e 18000 m^3/s. Para cada uma delas, calculou-se a alocação ótima segundo duas hipóteses : na primeira, o volume de espera em cada reservatório pode ser igual ao seu volume útil, enquanto que na segunda se impôs a restrição de que o volume de espera fosse sempre menor que um dado percentual do volume útil. As tabelas IV.13 a IV.18 apresentam os resultados obtidos.

U S I N A	VOLUME DE ESPERA		DURAÇÃO CRÍTICA (DIAS)	u (m^3/s)	$\bar{u}$ (m^3/s)
	($10^6 m^3$)	(% $v_{útil}$)			
FURNAS	732	4,3	13,7	3659	5000
MASCARENHAS DE MORAES	89	3,5	15,8	3947	4400
MARIMBONDO	1069	20,3	31,1	6511	7500
ÁGUA VERMELHA	1754	33,4	49,2	6869	∞
EMBORCAÇÃO	702	5,4	16,1	1887	∞
ITUMBIARA	2994	21,9	24,1	4791	∞
SÃO SIMÃO	4778	85,6	42,0	5226	∞
ILHA SOLTEIRA	8078	63,0	70,6	12096	∞

TABELA IV.13 - Alocação Ótima de Volumes de Espera

Restrição em Jupiá : 16000 m^3/s

v_e máximo : 100% $v_{útil}$

Energia Armazenada : 87829 MWmês

U S I N A	VOLUME DE ESPERA		DURAÇÃO CRÍTICA (DIAS)	u (m^3/s)	$\bar{u}$ (m^3/s)
	($10^6 m^3$)	(% $v_{útil}$)			
FURNAS	1798	10,4	21,5	2958	5000
MASCARENHAS DE MORAES	227	9,1	21,7	3237	4400
MARIMBONDO	1783	33,9	37,0	5557	7500
ÁGUA VERMELHA	1663	32,2	47,9	5938	∞
EMBORCAÇÃO	960	7,4	18,9	1717	∞
ITUMBIARA	3623	26,5	26,5	4333	∞
SÃO SIMÃO	2234	40,0	28,0	5621	∞
ILHA SOLTEIRA	5136	40,0	56,3	12096	∞

Tabela IV.14 - Alocação Ótima de Volumes de Espera

Restrição em Jupiá : 16000 m^3/s

v_e máximo : 40% $v_{útil}$

Energia Armazenada : 86942 MWmês

U S I N A	VOLUME DE ESPERA		DURAÇÃO CRÍTICA (DIAS)	u (m^3/s)	$\bar{u}$ (m^3/s)
	($10^6 m^3$)	(% $v_{útil}$)			
FURNAS	633	3,7	12,8	3745	5000
MASCARENHAS DE MORAES	76	3,1	15,0	4033	4400
MARIMBONDO	890	16,9	28,7	6664	7500
ÁGUA VERMELHA	1510	29,2	45,6	7082	∞
EMBORCAÇÃO	590	4,5	14,8	1971	∞
ITUMBIARA	2512	18,4	22,1	5117	∞
SÃO SIMÃO	3983	71,4	39,1	5777	∞
ILHA SOLTEIRA	6705	52,3	64,3	13096	∞

Tabela IV.15 - Alocação Ótima de Volume de Espera

Restrição de Jupiá : 17000 m^3/s

v_e máximo : 100% $v_{útil}$

Energia Armazenada : 89680 MWmês

U S I N A	VOLUME DE ESPERA		DURAÇÃO CRÍTICA (DIAS)	u (m^3/s)	$\bar{u}$ (m^3/s)
	($10^6 m^3$)	(% $v_{útil}$)			
FURNAS	1339	7,8	18,6	3223	5000
MASCARENHAS DE MORAES	159	6,4	19,1	3513	4400
MARIMBONDO	1409	26,8	33,8	5957	7500
ÁGUA VERMELHA	1541	29,8	46,1	6367	∞
EMBORCAÇÃO	689	5,3	16,0	1897	∞
ITUMBIARA	2727	20,0	23,0	4932	∞
SÃO SIMÃO	2235	40,0	29,0	6191	∞
ILHA SOLTEIRA	5136	40,0	56,3	13096	∞

Tabela IV.16 - Alocação Ótima de Volumes de Espera

Restrição em Jupiá : 17000 m^3/s

v_e máximo : 40% $v_{útil}$

Energia Armazenada : 89176 MWmês

U S I N A	VOLUME DE ESPERA		DURAÇÃO CRÍTICA (DIAS)	u (m^3/s)	$\bar{u}$ (m^3/s)
	($10^6 m^3$)	(% $v_{útil}$)			
FURNAS	512	3,0	11,5	3861	5000
MASCARENHAS DE MORAES	57	2,3	13,3	4153	4400
MARIMBONDO	708	13,5	25,9	6860	7500
ÁGUA VERMELHA	1252	24,2	41,5	7348	∞
EMBORCAÇÃO	497	3,8	13,6	2047	∞
ITUMBIARA	2111	15,4	20,3	5411	∞
SÃO SIMÃO	3306	59,2	36,3	6275	∞
ILHA SOLTEIRA	5449	42,5	58,0	14096	∞

Tabela IV.17 - Alocação Ótima de Volume de Espera

Restrição em Jupiá : 18000 m^3/s

v_e máximo : 100% $v_{útil}$

Energia Armazenada : 91385 MWmês

U S I N A	VOLUME DE ESPERA		DURAÇÃO CRÍTICA (DIAS)	u (m^3/s)	$\bar{u}$ (m^3/s)
	($10^6 m^3$)	(% $v_{útil}$)			
FURNAS	816	4,7	14,5	3590	5000
MASCARENHAS DE MORAES	88	3,5	15,4	3888	4400
MARIMBONDO	964	18,3	29,2	6492	7500
ÁGUA VERMELHA	1354	26,2	43,2	6951	∞
EMBORCAÇÃO	520	4,0	13,9	2028	∞
ITUMBIARA	2156	15,8	20,5	5367	∞
SÃO SIMÃO	2235	40,0	29,8	6607	∞
ILHA SOLTEIRA	5136	40,0	56,3	14096	∞

Tabela IV.18 - Alocação Ótima de Volume de Espera

Restrição em Jupiá : 18000 m^3/s

v_e máximo : 40% $v_{útil}$

Energia Armazenada : 91192 MWmês

Pode-se observar que, à medida que a restrição em Jupiá se torna menos severa, a energia armazenada no sistema aumenta e os volumes de espera diminuem. Para uma mesma vazão de restrição em Jupiá, a alocação ótima quando existe limitação para o máximo volume de espera em cada reservatório tem energia armazenada no sistema menor. Por exemplo, para $\bar{u}$ em Jupiá igual a 16000 m^3/s, a energia armazenada passa de 87829 MWmês (sem restrições em v_e) para 86942 MWmês ($v_{ei} \leq 0{,}4\ (v\ útil)_i$).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

V.I. Conclusões

O método da curva volume-duração proposto por Beard | 9 | aloca volume de espera em um reservatório de forma a garantir a probabilidade de ocorrência de inundações à jusante igual a pré-especificada. No entanto, prova-se (item II.2) que o risco associado ao volume de espera assim calculado é maior que o risco meta. Os estudos desenvolvidos no capítulo II com relação a este método e tendo como caso exemplo o reservatório de Furnas permitem concluir que:

i) A estimação da curva volume-duração usando o ajuste da distribuição Log Pearson tipo III aos máximos volumes afluentes para cada duração é pouco sensível ao tamanho do histórico considerado. Substituindo-se este ajuste pelo uso da distribuição empírica obtida a partir do modelo estocástico de geração de séries sintéticas proposto por Kelman |13|, chegou-se à mesma conclusão;

ii) As diferenças encontradas entre as curvas volume-duração estimadas a partir dos dois métodos acima citados situam-se na faixa de 5%, o que está dentro da tolerância que se admite para o ajuste de parábola do segundo grau. Essas diferenças podem traduzir-se em diferenças percentuais elevadas quando encaradas sob o ponto de vista dos volumes de espera calculados, principalmente em se tratando de volumes de espera "pequenos";

iii) Os estudos de simulação com séries sintéticas indicam que as discrepâncias entre o risco meta e o risco real associado ao volume de espera calculado são relativamente pequenas.

Neste trabalho propõe-se o método dos volumes críticos para o cálculo do volume de espera. Este método, que procura representar mais precisamente a operação do reservatório, apresenta as seguintes características:

i) Faz uso da série total de vazões diárias e não apenas dos máximos;

ii) Prescinde do ajuste de uma distribuição de eventos extremos;

iii) Fornece a evolução diária dos volumes de espera de forma a permitir o enchimento do reservatório à medida que se aproxima o período seco;

iv) Mantém a probabilidade de inundações à jusante igual àquela pré-estabelecida.

A partir do exposto no Capítulo III e com base nos resultados obtidos para o caso estudo do reservatório de Furnas, pode-se concluir que:

i) O número de séries necessário para se estimar o volume de espera sem ajuste de uma distribuição de probabilidades aos volumes críticos é muito grande. Portanto, é necessário se dispor de um modelo estocástico de geração de vazões diárias para aplicação do método. A qualidade dos resultados fornecidos está intimamente ligada à capacidade do modelo em produzir séries sintéticas "semelhantes" às séries históricas. Neste trabalho, o modelo de geração foi adotado com base no trabalho desenvolvido por Barbosa |14|, que indica que o modelo proposto por Kelman |13| apresenta bons resultados quando aplicado à série de vazões afluentes a Furnas;

ii) A função risco meta, $\alpha(t)$ (necessariamente não crescente) é arbitrária, existindo infinitas funções tais que $(\alpha(1))^{-1}$ é igual ao período de retorno fixado para o evento emergência. Neste trabalho ado-

tou-se para $\alpha(t)$ o abatimento do risco de operação energética $\alpha_E(t)$ obtido por simulação. Uma das vantagens desta função é que se determina implicitamente o início e o final do período chuvoso. Observe-se que para o reservatório de Furnas o abatimento de $\alpha_E(t)$ resultou em menores volumes de espera entre as outras funções risco meta pesquisadas (constante e exponencial), respeitando-se as restrições de risco de cheias;

iii) A determinação do volume de espera para o dia t faz uso de uma regra simplificada para a operação do reservatório no período (t+1, h+1). Para construir esta regra é necessário adotar uma regra de operação energética para a usina, pois a distribuição dos volumes críticos é afetada pela regra simplificada. O caso estudo de Furnas indica que é bastante razoável usar a média das vazões turbinadas para atendimento do mercado de energia como regra aproximada para $d_E(t)$;

iv) Para se obter a cada dia t o volume de espera, é necessário efetuar uma recursão sobre todas as séries de vazão, o que demanda considerável esforço computacional. Com o objetivo de se reduzir tal demanda pode-se aumentar o intervalo de discretização. Os resultados obtidos para o caso de Furnas indicam que aumentar este intervalo até 4 dias não causa afastamento significativo da evolução obtida para intervalos diários, reduzindo o esforço computacional cerca de 4 vezes;

v) Uma análise de sensibilidade revelou, para o caso de Furnas que os volumes de espera fornecidos pelo método dos volumes críticos são pouco sensíveis a variações no comprimento do histórico de vazões diárias disponível.

Num sistema interligado de reservatórios a alocação

dos volumes de espera de forma a garantir o risco meta pode ser feita de diversas maneiras, de modo que mesmo alguns reservatórios que não possuam restrição própria compartilhem a responsabilidade de proteger o vale. Neste trabalho propõe-se adotar como distribuição dos volumes de espera ao longo do sistema aquela que minimize o "impacto energético" que o controle de cheias causa sobre o parque gerador reduzindo os riscos de inundação a um nível pré-fixado. Isto pode ser feito maximizando-se o valor esperado da energia armazenada no sistema no início do período seco. Este assunto é tratado no Capítulo IV deste trabalho e chega-se às seguintes conclusões:

i) Como não se dispõe de uma expressão analítica para a função objetivo, o problema deve ser resolvido por um processo de tentativa e erro, simulando-se a operação individualizada do sistema para cada alocação. O exemplo com o sistema formado apenas pelos reservatórios de Furnas e Marimbondo mostra que a demanda computacional deste processo é muito elevada e aumenta linearmente com o número de reservatórios no sistema;

ii) Para contornar a dificuldade acima referida, desenvolveu-se uma abordagem expedita a partir do método da curva volume-duração para distribuir os volumes de espera no sistema. A principal característica desta abordagem é prescindir da etapa de simulação, admitindo uma expressão analítica para a função objetivo. O estudo de caso do sistema Furnas-Marimbondo sugere que este método expedito pode ser usado para fornecer a ordem de grandeza das restrições fictícias;

iii) Este método expedito foi aplicado ao sistema de reservatórios formado pelos rios Grande e Paranaíba e das usinas Ilha Solteira e Jupiá no rio Paraná. Os resultados obtidos confirmam que à medida que a vazão de restrição em Jupiá se torna menos severa, a energia armazenada no sistema aumenta e os volumes

de espera diminuem. Cabe ressaltar que os resultados obtidos para este exemplo devem ser encarados como preliminares já que, para o caso real deve-se proceder a um estudo criterioso das máximas vazões afluentes aos postos considerados.

V.2 Recomendações

i) Os volumes de espera calculados pelo método dos volumes críticos são sensíveis à função risco meta adotada. Recomenda-se que seja pesquisada uma função de risco "ótima", no sentido de minimizar os volumes de espera alocados, tanto temporal quanto espacialmente;

ii) Com o intuito de se diminuir o esforço computacional, recomenda-se investigar a redução do número de séries necessárias para obter a evolução diária dos volumes de espera a partir do método dos volumes críticos;

iii) O vetor de restrições fictícias determinado pelo método expedito pode ser utilizado como dado de entrada para o método dos volumes críticos para se obter a alocação temporal dos volumes de espera. Além disso, este vetor pode servir como ponto inicial de um processo de otimização a partir do método dos volumes críticos com o objetivo de se reduzir o tempo de processamento necessário para se alcançar o valor ótimo da função objetivo.

Finalmente, cabem duas observações:

i) A questão de incorporar no cálculo dos volumes de espera a disponibilidade de previsão de vazões durante a operação do reservatório (um dos requisitos do plano probabilístico de controle de cheias) pode ser feita com o método dos volumes críticos. De fato, Kelman et al. |15| resolvem este problema quando se

dispõe de um modelo capaz de prever a vazão incremental não controlada entre a barragem e o local que se quer proteger. Note-se que, neste caso, a máxima vazão defluente do reservatório é uma variável aleatória. Recomenda-se que seja desenvolvido um procedimento semelhante ao do referido artigo para incorporar previsão de vazões afluentes ao reservatório.

ii) A atribuição de custo ao impacto energético a curto prazo causado pelo controle de cheias é feita através de um processo de simulação da operação a usinas individualizadas e foi descrita em Costa et al.|20|. Ressalte-se que naquele trabalho a função risco meta adotada foi a curva exponencial descrita em III.3.1.2.

APÊNDICE

ENERGIA ARMAZENADA

A energia E_i gerada a cada instante pela i-ésima usina hidrelétrica é diretamente proporcional à vazão turbinada $q(m^3/s)$ e à altura de queda líquida h (m) (isto é, à diferença entre a cota da superfície livre do reservatório e a cota do canal de fuga)

$$dE_i = 10^{-3} g \eta_{ti} \eta_{gi} q h \, dt \qquad \text{(MWs)} \qquad \text{(A.1)}$$

onde

$g = 9{,}81 m/s^2$

η_{ti} : Rendimento das turbinas

η_{gi} : Rendimento dos geradores

Observe-se que, a rigor, o rendimento das turbinas depende da altura da queda e da vazão turbinada. Seguindo-se o procedimento comum, adota-se, neste trabalho, η_{ti} constante e define-se o rendimento do grupo turbina-gerador, η_i como

$$\eta_i = \eta_{ti} \eta_{gi} \qquad \text{(A.2)}$$

Energia armazenada em um reservatório é definida como a energia gerada ao se deplecionar totalmente o reservatório, considerando afluências nulas. Neste caso

$$q = - \frac{dv_i}{dt} \qquad \text{(A.3)}$$

onde v_i é o volume deplecionado

Caracterizando-se o estado do reservatório em termos

da fração ξ do volume máximo armazenável $\bar{v}_i$,

$$\xi_i = \frac{v_i}{\bar{v}_i} \tag{A.4}$$

obtém-se

$$dv_i = \bar{v}_i d\xi_i \tag{A.5}$$

e

$$h_i = h_i\ (\xi)$$

Substituindo-se em (A.1) e integrando, a energia armazenada na usina i, EA_i é dada por

$$EA_i = 10^{-3}\ g\eta\bar{v}_i \int_0^{\xi_i} h_i(\xi)d\xi \qquad \text{(MWs)} \tag{A.6}$$

Se $\theta = \xi/\xi_i$ a equação acima pode ser escrita como

$$EA_i = 10^{-3}\ g\eta\bar{v}_i \int_0^1 h_i(\xi_i\theta)\xi_i d\theta = 10^{-3}\ g\eta v_i \int_0^1 h_i(\xi_i\theta)d\theta \qquad \text{(MWs)} \tag{A.7}$$

Numa cascata de reservatórios a energia armazenada depende tanto do estado de cada reservatório do sistema quanto da operação realizada para deplecioná-los. Usualmente, faz-se a hipótese de operação em paralelo, que reflete a prática operativa de procurar manter os reservatórios em níveis percentuais próximos. Mais especificamente, deplecionar os reservatórios paralelamente ao volume significa que, a cada instante, $\xi_1 = \xi_2 = \ldots = \xi_n = \xi$, isto é, os reservatórios operam à mesma percentagem do volume máximo.

Neste caso, a energia armazenada é definida como a energia gerada ao se deplecionar paralelamente ao volume os reservatórios entre os estados inicial e final, sem considerar novas afluências.

Quando o estado do sistema de reservatórios for caracterizado por $(\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n)$, $\xi_i \overset{\leq}{} \xi_j$, a energia armazenada é calculada supondo-se que a partir deste estado o deplecionamento se faz paralelamente ao volume disponível v_i em cada reservatório e portanto segundo |17|.

$$EA = c \sum_{i \in R} v_i \int_0^1 \sum_{j \in J_i} \eta_j \, h_j(\xi_j \theta) d\theta \qquad \text{(MW mês)} \qquad (A.8)$$

onde

c = $9{,}81 \times 10^{-3}/2{,}6298$

R = Conjunto de usinas com reservatórios

J_i = Conjunto de usinas em cascata a partir da usina de reservatório i, inclusive, até a última à jusante

η_j = Rendimento global do conjunto turbina-gerador

$h_j(.)$ = Altura (m) de queda líquida do reservatório j expressa em função de ξ_j ou valor da altura líquida constante para usinas sem reservatórios

v_i = Volume ($10^6 m^3$) armazenado na usina i

BIBLIOGRAFIA

|1| KELMAN, J., Tópicos de Investigação em Controle de Cheias, in IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Anais, Vol. 4 : 163-173, Fortaleza, Ceará, 1981.

|2| GRULL, D., Operação Hidráulica de Reservatórios, Enfoques Probabilísticos e Determinísticos de Condições de Contorno. Revista de Hidrologia e Recursos Hídricos, 3(1) : 31-41, 1981.

|3| BRAGA JR, B.P.F.; LINSLEY, R.K.; FRANZINI, J.B., The Value of Real-Time Streamflow Forecasting for Multi-Objective Reservoir Operation, in International Symposium on Real-Time Operation of Hydrosystems, Proceedings Vol. II, 514-533, Ontario, Canadá, 1981.

|4| WILKINSON, J.C., Operational Aspects of Water Resource Problems. In E.H. Lloyd, T. O'Donnell, J.C. Wilkimon (Ed.), The Mathematics of Hydrology and Water Resources, Academic Press Inc., 1979.

|5| KELMAN, J.; DAMAZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; COSTA, J.P., Operação de um Reservatório para Controle de Cheias, Revista de Hidrologia e Recursos Hídricos, 2(2) : 139-150, 1980.

|6| LINSLEY, R.K.; FRANZINI, J.B., Water-Resources Engineering. Tokio, Mc Graw-Hill Book Company, 2ª ed., 1964.

|7| U.S. Army Corps of Engineers, Hydrological Engineering Center, HEC-5C, Simulation of Flood Control and Conservation Systems, Users Manual, California , 1976.

|8| EICHERT, B.S., Reservoir Storage Determination by Computer Simulation of Flood Control and Conservation Systems. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Technical Paper 66, 1979.

|9| BEARD, L.R., Flood Control Operation of Reservoirs, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 89, No. HY1, 1-23, 1963.

|10| GCOI, Subcomitê de Estudos Energéticos, Determinação de Volumes de Espera para Controle de Cheias nos Reservatórios da Bacia do Rio Paraná, SCEN-GTEH 02/80, 1980.

|11| GCOI, Subcomitê de Estudos Energéticos, Determinação de Volumes de Espera para Controle de Cheias nos Reservatórios do Rio Grande, SCEN-CECCA/02/77, 1977.

|12| U.S. Army Corps of Engineers, Hydrological Engineering Center, Regional Frequency Computation, Computer Program 723-X6-L7390, 1972.

|13| KELMAN, J., Stochastic Modeling of Hydrologic Intermitent Daily Processes, Hydrology Paper nº 89, Colorado State University, 1977.

|14| BARBOSA, P.J., Modelagem Estocástica de Vazões Diárias. Tese de Mestrado submetida à COPPE/UFRJ, 1981.

|15| KELMAN, J.; DAMAZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; COSTA, J.P., Flood Control Restrictions for a Hydroelectric Plant, in International Symposium on Real-Time Operation of Hydrosystems, Proceedings Vol. II 790-798, Ontário, Canadá, 1981.

|16| SHEN, H.W.; TODOROVIC, P., Floods and Droughts. In H.W. Shen (Ed.), Stochastic Approaches to Water Resources, Fort Collins, Colorado, EUA, 1976.

|17| TERRY, L.A., Modelo a Sistema Equivalente, Relatório Técnico CEPEL 1705/80, 1980.

|18| KUESTER, J.L.; MIZE, J.H., Optimization Techniques With FORTRAN, Mc Graw Hill Book Company, 1973.

|19| PINHEIRO, M.C., Cheias : Análise de Freqüências e Regionalização de Quantis, Tese de Mestrado submetida à COPPE/UFRJ, 1982.

|20| COSTA, J.P., DAMAZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; KELMAN, J., Uma Metodologia para Controle de Cheias, VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriu, Santa Catarina, 1981.