vazoes futuras, o que permitiria uma soluçao determinística para o cálculo dos volumes de espera, adota-se uma soluçao probabilística.

A partir de um estudo de freqüência dos eventos máximos com várias duraçoes da série histórica de vazoes, procura-se fazer ajustes de distribuiçoes teóricas de probabilidades para cada duraçao, através das quais pode-se determinar os volumes afluentes a cada duraçao associados a uma probabilidade p' de ocorrência.

A Figura 1 mostra a obtençao da Curva Volume x Duraçao para a probabilidade p'.

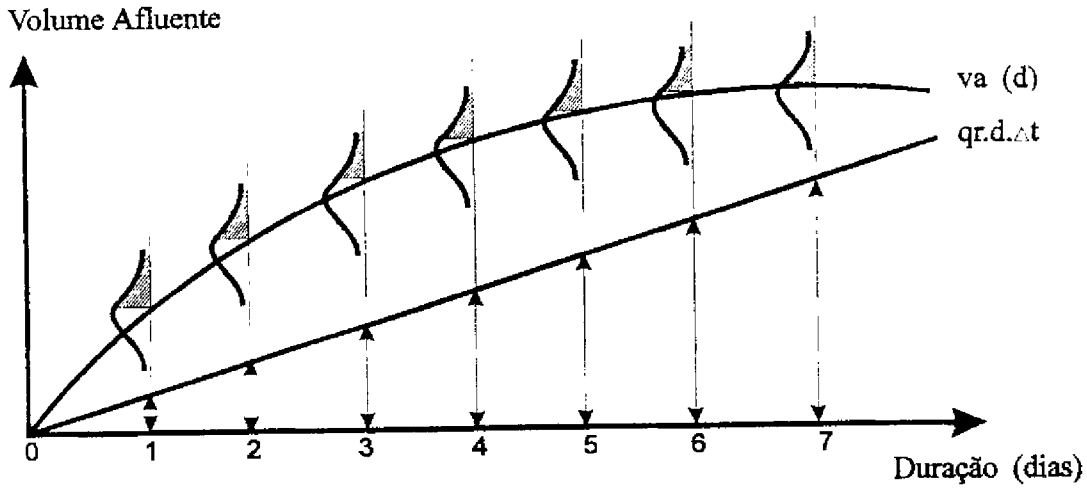

Figura 1. Obtenção da Curva Volume x Duração associada a probabilidade fixa p' de ocorrência

Neste caso, ***va (d)*** é tal que:

P [VA (d) va (d)] = p'

A questao fundamental que se coloca para a utilizaçao do método é relativa a qual distribuiçao teórica de probabilidade deve ser ajustada. Este assunto tem sido discutido em vários trabalhos conforme relatado em NERC (1975), USWRC (1977), Kite (1977) e ELETROBRAS (1987). Contudo, uma conclusao bastante difundida é que nao se dispoe de uma distribuiçao "ótima" para o ajuste a séries de vazoes extremas. Portanto, desejando-se uma maior segurança para o estudo, é necessário uma análise do ajustamento de diversas distribuiçoes Em geral, a proteçao considerada no controle de cheias, para situaçoes normais, nao vai além de uma recorrência de 50 anos. Portanto, o bom ajustamento da distribuiçao teórica à faixa amostral tem grande relevância nesta situaçao.

Uma outra dificuldade da aplicaçao do Método da Curva Volume x Duraçao é que o mesmo informa somente um único volume de espera para toda a estaçao chuvosa. Este método nao considera a variaçao do potencial de cheia com o decorrer da estaçao chuvosa. Tal soluçao, na medida em que existem interesses conflitantes no uso do aproveitamento, nao é eficiente. Realmente, em regioes com sazonalidade bem definida, o risco para o qual o volume de espera é dimensionado só se verifica no período inicial da estaçao chuvosa, decaindo conforme se aproxime o final da estaçao. Logo, a alocaçao constante do volume de espera superdimensiona a proteçao desejada. Há que se ressaltar, ainda, que, dependendo das vazoes futuras, pode-se nao conseguir o reenchimento total do

reservatório ao final da estaçao chuvosa, implicando numa reduçao das disponibilidades energéticas durante a estaçao seca que se segue.

A estratégia que vem sendo adotada para compatibilizar a manutençao do risco com a evoluçao temporal do período chuvoso, consiste na determinaçao de volumes de espera a partir da censura da série de vazoes naturais médias diárias, conforme o avanço da estaçao chuvosa.

Em um sistema de reservatórios, há ainda a necessidade de se determinar a alocaçao espacial dos volumes de espera. A existência de vários locais sujeitos à descargas de restriçao assim como a dependência temporal de um sistema em cascata, exigem o cálculo dos volumes de espera para cada um destes locais

Entretanto, como nem sempre estes locais estao imediatamente a jusante de reservatórios capazes de alocar estes volumes, é necessário se dispor destes em reservatórios mais a montante, conforme será visto na aplicaçao à bacia do Alto Paraná. Este procedimento pode tornar a operaçao de controle de cheias vulnerável à distribuiçao de cheia na bacia.

Visando superar as dificuldades apontadas para a alocaçao temporal e espacial de volumes de espera, o setor elétrico brasileiro, através do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica , CEPEL, vem realizando estudos de novas alternativas metodológicas de cálculo e alocaçao de volume de espera Já existe hoje desenvolvido o Método das Trajetórias Críticas que, associado à Teoria das Condiçoes de Controlabilidade, permite a determinaçao, para um sistema de reservatórios, dos volumes de espera necessários e suficientes para o controle de cheias em todo o sistema.

3.1.2 Metodologia Alternativa

- **Método das Trajetórias Críticas**

Este método foi desenvolvido no CEPEL por Kelman (1987) e permite determinar para cada dia da estaçao chuvosa, o volume de espera associado a uma probabilidade de ocorrência p', previamente estabelecida.

O método emprega um algoritmo recursivo sobre as vazoes naturais médias diárias do local a ser estudado. Partindo-se de um volume de espera nulo no final do último dia do período chuvoso, no dia h de um ano i, da vazao média diária neste dia e da descarga de restriçao, determina-se o volume no início deste dia da seguinte forma.

$$ve(h,i) = max\ [O,\ (q(h,i) - qr)\ x\ \Delta t] \qquad (4)$$

onde: ve - volume de espera;

h - índice do último dia do período chuvoso;

i - índice do ano;

q(h,i) - vazao média diária no dia h do ano i;

qr - descarga de restriçao

_t - intervalo de discretizaçao (1 dia = 86400 s).

Ao início do penúltimo dia, o volume de espera deverá ser igual a:

$$ve\ (h\text{-}1) = max\ [0,\ (q(h\text{-}1,i) - qr)\ x\ \Delta t + ve\ (h,i)] \qquad (5)$$

De uma forma geral, entao, dispondo-se sempre do volume necessário no início do dia posterior, pode-se, recursivamente, determinar-se os volumes necessários nos dias anteriores:

$$ve\ (h\text{-}1) = max\ [0,\ (q(h\text{-}1,i) - qr)\ x\ \Delta t + ve\ (h,i)] \qquad (6)$$
$$t=1,2,3\ldots,h$$

A evoluçao do volume de espera ao longo do tempo para o i-ésimo ano denomina-se trajetória crítica. A figura 2 a seguir, apresenta a trajetória crítica para o ano i, mostrando as regioes segura e insegura para a operaçao de controle de cheias do reservatório.

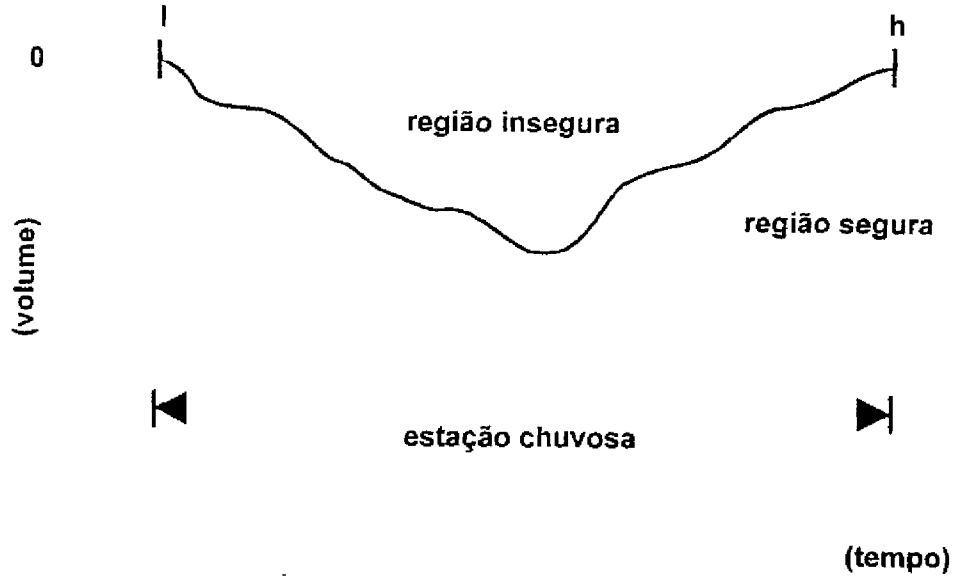

Figura 2. Evoluçao do Volume de Espera para o i-ésimo ano.

Suponha, agora, 3 anos distintos, cujas trajetórias estao na figura 3. A envoltória das mesmas, representada em linha tracejada, garantirá que em nenhum instante, nao importando o ano ocorrido, a vazao defluente será superior a descarga de restriçao.

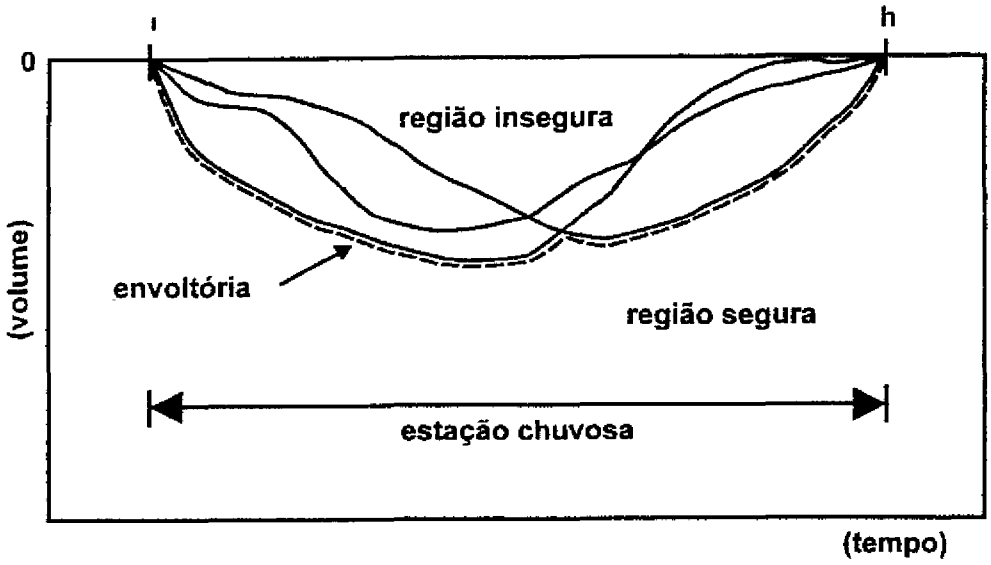

Figura 3. Definiçao da envoltória das trajetórias críticas.

Em uma série de n anos, conseqüentemente n trajetórias, a envoltória garantirá a nao ocorrência de violaçao da descarga de restriçao.

A envoltória é definida por:

$$v^1(t) = max\ [ve(t,i);\ I - 1, 2, \ldots, n];\ t = 1, 2, \ldots, h$$

Como a seqüência de vazoes futuras nao é conhecida, adota-se, assim como no caso da Curva Volume x Duraçao, uma abordagem probabilística, sendo que neste caso o universo de possíveis seqüências de vazoes futuras é obtido através de séries sintéticas de vazoes. A utilizaçao de séries sintéticas é imperiosa pois as séries históricas de vazoes diárias disponíveis nos locais de interesse para os estudos de prevençao de cheias geralmente nao ultrapassam 60 anos, período este, ainda pequeno para a determinaçao de trajetórias associadas aos tempos de retorno comumente adotados pelo setor elétrico brasileiro.

Como, provavelmente, a alocaçao da envoltória obtida das séries sintéticas de vazoes seria inviável, é necessário a aceitaçao de alguma probabilidade p' de insucesso no controle de cheias. Define-se, entao, um conjunto de k trajetórias críticas que nao serao consideradas na determinaçao da envoltória de volumes de espera.

Durante os estudos e testes realizados até entao com o método das Trajetórias Críticas, o modelo de geraçao de séries sintéticas utilizado tem sido o modelo DIANA, desenvolvido por Kelman (1986).

• Teoria das Condiçoes de Controlabilidade

O Método das Trajetórias Críticas resolve a questao da alocaçao temporal dos volumes de espera, entretanto, para um sistema de reservatórios é necessário, ainda, a determinaçao de como este volume deve estar disponível espacialmente.

Os problemas de sistemas multireservatórios para controle de cheias foram analisados teoricamente pela primeira vez por Marien (1984), levando a formulaçao da teoria das condiçoes de

controlabilidade para a análise determinística de sistemas de reservatórios com apenas um local sujeito à restriçao. Damázio (1989) estendeu estes resultados de forma a considerar também sistemas com múltiplos locais sujeitos à restriçao, agregando ainda à esta teoria a noçao de envoltórias, permitindo um tratamento estocástico do problema.

Tomando como exemplo um sistema de dois reservatórios, R_2 e R_1, em série, sendo R_2 o reservatório de montante, no qual existem restriçoes de vazao máxima imediatamente a jusante de cada reservatório. O cálculo do volume de espera a ser alocado em cada reservatório e em cada dia deve considerar que existe um mínimo espaço vazio a ser alocado em R_2, funçao exclusiva de sua restriçao e das afluências a R_2. Por outro lado, o mínimo espaço vazio a ser alocado à jusante depende do total afluente à R_1 (soma da afluência à R_2 com a afluência incremental entre R_2 e R_1) e também do espaço vazio que tiver sido alocado em R_2.

Para um dia qualquer t, o domínio das soluçoes possíveis é caracterizado pelas seguintes equaçoes, chamadas de condiçoes de controlabilidade:

$$E_1(t) \geq ve_1(t) \tag{1}$$

$$E_2(t) \geq ve_2(t) \tag{2}$$

$$E_1(t) + E_2(t) \geq ve_{1,2}(t) \tag{3}$$

onde E(t) é o espaço vazio e ve(t) é o limite inferior que se deseja calcular

Os valores de ve(t) servem para definir a regiao viável para os espaços vazios no dia t. Em geral, para qualquer sistema multireservatório a regiao viável será sempre caracterizada por limites inferiores ve(t) para somas de espaços vazios de reservatórios pertencentes aos vários subsistemas existentes neste sistema.. Os subsistemas do sistema de dois reservatórios descritos acima sao $\{R_1\}$, $\{R_2\}$ e $\{R_1, R_2\}$. A figura 4 ilustra a fronteira entre as regioes viável e inviável para o controle de cheias neste sistema como um todo para um determinado dia.

Damázio (1989), mostra como os limites inferiores de espaços vazios, ve(t) podem ser obtidos para cada subsistema.

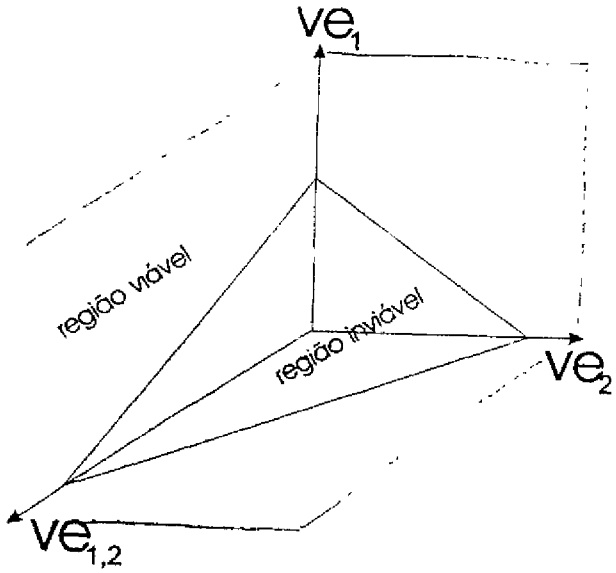

Figura 4: Regioes viáveis e inviáveis para os espaços vazios num determinado dia

3.2 Regras de Operaçao para Controle de Cheias

Uma vez escolhida a alternativa de alocaçao de volume de espera, passa-se à segunda etapa do planejamento da operaçao hidráulica onde podem ser visualizadas duas condiçoes, a saber: operaçao normal e operaçao em emergência

• Operaçao Normal

Esta operaçao pode ser caracterizada pela ocorrência de uma cheia que permanece, ao longo de sua duraçao, sob o controle do Centro de Operaçao, nao havendo perspectivas de esgotamento dos volumes de espera dos reservatórios nem da liberaçao de descargas defluentes que ultrapassem restriçoes a jusante dos aproveitamentos.

Durante a operaçao normal para controle de cheias, sao recebidas e processadas as informaçoes de dados provenientes de postos hidrometeorológicos da rede de mediçao, oferecendo um quadro aproximado da situaçao real do sistema e permitindo uma boa confiabilidade das decisoes.

É indispensável ainda a disponibilidade de regras de operaçao que recomendem os valores das descargas totais em funçao de vários parâmetros, tais como níveis em pontos críticos dos rios, vazoes afluentes em pontos situados a montante ou a jusante dos reservatórios, vazoes dos principais afluentes, alturas de chuva etc. Estas regras sao frutos de uma longa experiência operativa ou podem ser obtidas de simulaçoes.

As regras básicas adotadas em uma operaçao normal sao:

1. enquanto a vazao afluente for inferior ao limite da restriçao de defluência, a descarga defluente total (vertida + turbinada) deve ser igual à vazao afluente. Em conseqüência, o nível do reservatório deve se manter no valor recomendado do volume de espera,

2. quando a vazao afluente for superior ao limite da restriçao de defluência, a descarga defluente total deve ser igual ao limite da restriçao de defluência Em conseqüência, o nível do reservatório começa a subir, iniciando-se a utilizaçao do volume de espera e o amortecimento da cheia;

3. tendo sido o volume de espera ocupado parcial ou totalmente e iniciando-se o seu esvaziamento, a descarga defluente total deve ser mantida igual ao valor limite da restriçao de defluência, de forma a restabelecer o mais prontamente possível o volume de espera, sem provocar danos a jusante;

4 proximamente ao restabelecimento do volume de espera, a descarga defluente total deve ser reduzida do limite da restriçao de defluência para o valor da afluência, através de uma taxa de reduçao de defluência que nao provoque danos a jusante.

- **Operaçao em Emergência**

Esta operaçao pode ser caracterizada pela ocorrência de uma cheia com perspectivas de esgotamento dos volumes de espera dos reservatórios, sendo necessário providenciar descargas defluentes totais que superam as limitaçoes impostas por eventuais restriçoes, ocasionando situaçoes críticas e provocando danos.

Outra situaçao possível que caracteriza a condiçao de emergência é a perda de comunicaçao da usina com o Centro de Operaçao. Neste caso, o elemento encarregado da operaçao da usina deve estar autorizado para tomar as providências cabíveis, para as quais deve estar disponível uma sistemática de procedimentos bem definidos, que garantam a segurança da barragem.

Em ambas as situaçoes, é indispensável a existência de regras de operaçao que indiquem, a cada instante, qual defluência deve ser programada de forma a garantir a segurança da estrutura das barragens, sem provocar enchentes mais críticas do que as que ocorreriam sob condiçoes naturais de escoamento. Um exemplo desta regra é o diagrama de operaçao em emergência apresentado no Anexo 1.

- **Diagrama de Operaçao em Emergência**

Uma ferramenta bastante utilizada, durante a ocorrência de uma cheia, para obtençao do valor da defluência mínima necessária em cada aproveitamento, é o denominado diagrama de operaçao em emergência apresentado por U.S Army - Corps of Engineers (1959), Beard (1963), CECCA (1977). Este diagrama define a descarga que deve ser defluída, quando sao conhecidos os níveis do reservatório e a taxa de variaçao dos níveis ou a afluência, tendo em vista uma previsao do mínimo volume afluente que pode ser esperado em uma particular cheia. A hipótese admitida é de que o hidrograma tenha atingido o seu pico para o valor atual e de que os valores futuros ocorrerao segundo uma lei exponencial que define a recessao das vazoes de um rio. O volume mínimo afluente a ser esperado pode ser calculado pela área sob o trecho de descida do hidrograma. A partir deste volume afluente mínimo esperado, com uma dada afluência presente e o nível atual do reservatório, pode ser calculada a descarga defluente, de modo que seja utilizado o volume do reservatório até a sua capacidade disponível, limitada no seu nível máximo normal ou, quando possível, pela sua curva de sobrecarga induzida. Uma família de curvas características de afluências, como a mostrada no Anexo 1, pode ser traçada a partir destes cálculos

- **Curva de Sobrecarga Induzida**

No esquema a ser desenvolvido para operaçao em emergência, salienta-se o conceito de curva de sobrecarga induzida A sobrecarga induzida é obtida quando as comportas do vertedor sao operadas todas ao mesmo tempo, através de aberturas parciais, de modo a possibilitar o armazenamento do excesso de afluência em relaçao à descarga defluente total. A sobrecarga induzida, para cada abertura parcial das comportas, está limitada pela cota do topo das comportas do vertedor para esta mesma abertura, de modo a evitar o galgamento das mesmas.

4. Aplicaçao à Bacia do Alto Paraná

A bacia do Alto Paraná drena parte das regioes Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil, conforme mostra o Anexo 2. Está localizada no eixo de maior desenvolvimento do país, envolvendo além do Distrito Federal, áreas dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Sao Paulo, Paraná e Santa Catarina.

Tendo em vista as diversidades hidrológicas, bem como a topologia dos aproveitamentos, pode-se considerar, do ponto de vista do controle de cheias, três sistemas distintos:

1. Bacia do Alto Paraná até Jupiá;

2. Bacia do rio Paranapanema;

3. Bacia do rio Iguaçu;

A bacia do Alto Paraná até Jupiá, com 470.000 km² de área de drenagem, abrange além do trecho do rio Paraná, os rios Paranaíba, Araguari, Grande, Pardo e Tietê. Nestes rios estao implantados 27 aproveitamentos hidroelétricos pertencentes às empresas FURNAS, CESP, CEMIG e CELG, sendo que 14 possuem reservatórios, nos quais sao alocados volumes de espera.

A bacia do rio Paranapanema possui uma área de drenagem de cerca de 100.000 km². Todos os 6 aproveitamentos hidroelétricos existentes pertencem à CESP, sendo que 3 deles possuem reservatórios, utilizados no controle de cheias

A bacia do rio Iguaçu, com uma área de drenagem de 68.000 km², possui, até o momento, 5 aproveitamentos, sendo 4 dispostos em cascata no rio Iguaçu, e um de menor dimensao no rio Chopim. Estes aproveitamentos pertencem às empresas COPEL e ELETROSUL, sendo que 2 deles possuem reservatórios os quais sao utilizados também para controle de cheias.

No rio Paraná, a montante da confluência com o rio Iguaçu, localiza-se o aproveitamento binacional de Itaipu, com uma área de drenagem da ordem de 820.000 km²

O Anexo 3 apresenta um diagrama esquemático dos aproveitamentos existentes na bacia do rio Paraná.

O conjunto de aproveitamentos a montante de Jupiá se constitui no principal sistema, tendo em vista a sua dimensao e complexidade da sua operaçao.

4.1 Restriçoes Hidráulicas Existentes na Bacia

A bacia do rio Paraná possui diferentes tipos de restriçoes hidráulicas a serem protegidas com medidas preventivas de controle de cheias, descritas de forma resumida a seguir.

Iniciando pelo rio Grande, tem-se uma restriçao de defluência de 400 m3/s no conjunto Camargos/Itutinga, condicionada às enchentes na cidade de Ribeirao Vermelho, 190 km a jusante. Em particular, ocorrem inundaçoes nesta cidade com vazoes superiores a 1.000 m3/s, compostas pela

soma das defluências das usinas às contribuiçoes da bacia incremental, representadas principalmente pelas vazoes dos rios Capivari e das Mortes.

A jusante de Furnas tem-se uma vazao de restriçao de 4.000 m3/s devido a um porto de balsas em Sao Joao Batista do Glória, ranchos ribeirinhos e portos de areia.

A usina de Mascarenhas de Moraes, pelo posicionamento de seus vertedouros, nao pode defluir vazoes superiores a 4.400 m3/s sem correr o risco de inundaçao da sua casa de força. Operando de forma conjugada com a usina de Estreito, já que seu canal de fuga sofre influência do remanso desse reservatório, a sua restriçao pode ser aumentada até 6.000 m3/s Possui, também, restriçao de nível mínimo no seu reservatório (665,00 m = 89,2% V.U.) em funçao das tomadas para captaçao de água de usinas açucareiras na área do lago.

As usinas de Estreito e Jaguara possuem uma restriçao de 4500 m3/s em funçao de inundaçao em trecho da rodovia BR-050, entre as cidades de Uberaba (MG) e Ribeirao Preto (SP) Por outro lado, Volta Grande deve respeitar 5 000 m3/s para evitar a inundaçao de casas de campo ao longo do rio, enquanto Porto Colômbia tem como limite 7.000 m3/s para nao causar problemas para a estrutura da ponte Gumercindo Penteado, da BR-364.

O último aproveitamento do rio Grande com restriçoes operativas é Marimbondo, de FURNAS. Possui uma restriçao de nível máximo (445,73 m = 95% V.U) que visa manter o nível na ponte Gumercindo Penteado, da BR-364, na cota 446,40 m, ou seja, 50 cm abaixo do seu tabuleiro, evitando o acúmulo de plantas aquáticas, o represamento de ilhas flutuantes, obstruçoes ao fluxo de água entre seus pilares e à montante da viga lateral, e as sucessivas submersoes e emersoes da viga da ponte. Para jusante, Marimbondo possui uma descarga de restriçao de 8.000 m3/s, que atinge áreas urbanizadas da própria usina, ranchos de pescadores e causa a erosao do acesso à ponte rodoviária da BR-153.

No rio Paranaíba, o aproveitamento de Emborcaçao possui uma vazao de restriçao de 5.000 m3/s, a partir da qual existe a inundaçao da estrada de acesso à própria usina

A usina de Nova Ponte, no rio Araguari, afluente do rio Paranaíba, tem sua restriçao variável, da ordem de 2.000 m3/s, em funçao da afluência máxima de 2.500 m3/s de aduçao dos dois túneis de desvio da obra da usina de Miranda, 80 km a jusante de Nova Ponte.

A usina de Itumbiara passou, a partir da cheia de 1983, a operar para controlar a vazao de 7.000 m3/s, visando evitar a inundaçao de áreas de benfeitorias da cidade de Itumbiara, localizada 13 km a jusante da barragem.

Finalmente, o aproveitamento de Sao Simao, nesse mesmo rio, possui uma restriçao de 16.000 m3/s referente a ponte da rodovia BR-365 na fronteira dos estados de Minas Gerais e Goiás. Vale ressaltar que tal restriçao corresponde a uma vazao de recorrência bastante elevada

No rio Tietê, tem-se o aproveitamento de Barra Bonita com uma restriçao, bastante severa, de 1 800 m3/s, a qual interrompe a navegaçao fluvial por impedimento do funcionamento da eclusa.

No rio Paraná, a restriçao de Jupiá, cujo valor é 16.000 m3/s, é a mais severa de toda a bacia, haja visto o grande impacto causado pelo seu rompimento, provocando inundaçoes nas cidades de Três Lagoas, Panorama e Presidente Epitácio, e o seu baixo período de retorno, de aproximadamente 2 anos. Portanto, em condiçoes naturais, na ausência do sistema de reservatórios de montante, o risco de ocorrerem vazoes iguais ou superiores à restriçao seria de 50% a cada ano.

Na bacia do rio Paranapanema, todos os aproveitamentos pertencem à empresa CESP. Esta bacia possui um regime de vazoes misto, isto é, ora influenciado pela sazonalidade da regiao Sudeste, ora pelo regime dos rios da regiao Sul.

Em Jurumirim, defluências da ordem de 800 m3/s acarretam o início do galgamento e conseqüente inundaçao da antiga usina de Piraju, imediatamente a jusante. Vazoes de 1.200 m3/s trazem problemas na própria bacia de dissipaçao de Jurumirim.

Na usina de Chavantes, a vazao de restriçao adotada é de 1.800 m3/s, haja visto que valores superiores interrompem o tráfego na ponte ferroviária existente a jusante Com 2.200 m3/s surgem problemas na bacia de dissipaçao da usina e inicia-se o alagamento do seu núcleo administrativo. As soluçoes de relocaçao das pontes e instalaçoes da CESP sao de custo elevado, exigindo a alocaçao de volumes de espera e outras medidas para controlar a restriçao de 1 800 m3/s, cujo período de retorno é de 6 anos.

Finalmente, em funçao das últimas cheias, é decretada "Situaçao de Emergência" nos municípios de Marilena, Sao Pedro do Paraná, Porto Rico, Querência do Norte e Umuarama sempre que as vazoes em Porto Sao José, no rio Paraná, junto a foz do Paranapanema, excederem 21.000 m3/s.

Neste caso, para controlar as vazoes, a usina de Capivara passa a ser operada, temporariamente, com uma restriçao condicionada, de modo que nao seja excedido os 21.000 m3/s, resultante da soma das vazoes dos rios Paraná e Paranapanema.

No rio Iguaçu o aproveitamento de Foz do Areia, o primeiro da cascata, possui uma restriçao de operaçao a montante, caracterizada pela influência, para certas condiçoes, nos níveis de inundaçao da cidade de Uniao da Vitória, localizada na cabeceira do seu reservatório. A influência do nível deste reservatório sobre o nível do rio Iguaçu, em Uniao da Vitória, é explicada pelas curvas de remanso determinadas pela COPEL. Assim, para cada situaçao de afluência, o nível de restriçao a ser considerado em Foz do Areia pode ser determinado em tempo real, com base nos níveis da água observados, simultaneamente, em Foz do Areia, Porto Vitória e Uniao da Vitória.

Salto Santiago e Salto Osório, a jusante de Foz do Areia, operam condicionando suas defluências às contribuiçoes incrementais observadas até a confluência com o rio Chopim, de forma a respeitar o valor de 17.000 m3/s nessa seçao para evitar danos à casa de força da usina Júlio de Mesquita Filho (JMF) A usina de Salto Santiago possui, ainda, restriçao de liberaçao de vazoes superiores a 19 000 m3/s, para evitar a inundaçao de sua própria casa de força.

4.2 Séries de Vazoes Disponíveis na Bacia

As séries de vazoes naturais médias diárias nos locais de interesse para os estudos de prevençao de cheias têm início de observaçao variável. As séries dos postos a montante de Jupiá foram estendidas até 1994, utilizando-se métodos de reconstituiçao de vazao natural baseados em balanço hídrico de reservatórios e/ou correlaçao entre postos fluviométricos.

4.3 Aplicaçao da Metodologia

A metodologia adotada para determinaçao dos volumes de espera para a bacia do rio Paraná é da Curva Volume x Duraçao, descrita no item 3 1 deste relatório. Esta metodologia vem sendo aplicada nesta bacia desde 1977. A única exceçao foi a utilizaçao do método das Tajetórias Críticas para o cálculo dos volumes de espera próprio em Nova Ponte, para a proteçao da obra UHE Miranda.

A variaçao temporal dos volumes de espera a serem alocados nos reservatórios desta bacia, a montante de Jupiá, foi obtida pela censura contínua das séries de vazoes naturais diárias, considerando, para o cálculo dos volumes de espera, séries cada vez menores, conforme o avanço da estaçao chuvosa

Na análise de freqüências, a distribuiçao de probabilidades adotada na determinaçao dos volumes em todos os locais foi a Log-Pearson III. Esta metodologia determina o volume vazio necessário para a proteçao de cada local sujeito a uma restriçao de vazao, denominados volume de espera próprio. Desta forma, foi aplicada a metodologia para os postos de Camargos, Furnas, Mascarenhas de Moraes, Jaguara, Volta Grande, Porto Colômbia, Marimbondo, Emborcaçao, Itumbiara, Sao Simao, Barra Bonita e Jupiá.

Os estudos de volume de espera para prevençao de cheias elaborados pelo GCOI normalmente contemplam várias alternativas de riscos. A faixa de valores de tempo de retorno usualmente considerada varia de 25 a 50 anos, exceto no caso de determinados locais, onde o impacto do rompimento da restriçao é tao grande, como a perda da própria usina, que prefere-se elevar o grau de proteçao aumentando o valor do tempo de retorno a ser adotado

Na bacia do rio Paranapanema os reservatórios da CESP tiveram seus volumes de espera dimensionados para cheias correspondentes a recorrência de 100 anos Estes valores sao alocados todo ano em funçao do regime de cheias conjunto das regioes Sudeste e Sul do Brasil.

A bacia do rio Iguaçu apresenta, atualmente, duas restriçoes que devem ser consideradas para o cálculo de volumes de espera, quais sejam: as casas de força de Salto Santiago e de Júlio de Mesquita Filho. Os volumes de espera definidos para proteger as restriçoes acima sao alocados de forma independente, pois os tempos de recorrência associados aos volumes nao sao iguais. Portanto, em Salto Santiago fica disponível um volume de espera para proteger a sua restriçao própria mais o volume necessário para proteger Júlio de Mesquita Filho

4.4 Resultados dos Volumes de Espera

Na bacia do Alto Paraná o caso mais crítico corresponde ao aproveitamento de Jupiá, pois está sujeito à restriçao mais severa da bacia e, por ser a fio d'água, nao pode alocar volume de espera para controlar suas defluências.

Tem-se, entao, que repartir o volume de espera necessário para proteçao da restriçao deste aproveitamento entre os demais reservatórios da bacia, além de se planejar uma operaçao conjugada de controle de cheias. Com exceçao dos aproveitamentos a fio d'água e dos reservatórios de Camargos e Barra Bonita, cujas operaçoes de controle de cheias visam exclusivamente a proteçao das restriçoes imediatamente a jusante dos mesmos, todos os demais aproveitamentos situados a montante de Jupiá participam desta repartiçao.

Considera-se que uma boa repartiçao do volume de espera calculado para Jupiá, do ponto de vista do controle de cheias, será aquela que mantiver a maior parcela desses volumes o mais próximo possível de Jupiá. O critério que vem sendo adotado desde 1982, baseado em uma relaçao linear com as médias das vazoes máximas mensais do histórico, nos meses da estaçao chuvosa (dezembro a abril), fornece uma distribuiçao segura para a operaçao integrada de controle de cheias nesta bacia, pois quanto mais a jusante o aproveitamento se localizar, maior será sua média e, conseqüentemente, maior será a parcela que lhe caberá do volume de Jupiá.

Para efeito de repartiçao dos volumes de espera destinados a proteçao de Jupiá, considera-se que os reservatórios de Furnas e Mascarenhas de Moraes formam um único reservatório, cuja vazao dos meses da estaçao chuvosa é igual a vazao média em Mascarenhas de Moraes

Para qualquer tempo de recorrência estudado, os volumes de espera de Jupiá, quando distribuídos pelos aproveitamentos de montante, sempre superam os volumes de espera necessários para o próprio aproveitamento, os denominados volumes próprios, que sao calculados para atender especificamente as restriçoes existentes a jusante de cada aproveitamento

No entanto, no caso das restriçoes a jusante de Mascarenhas de Moraes, Itumbiara e Nova Ponte, que sao respectivamente a casa de força da usina, a cidade de Itumbiara e a obra da usina de Miranda, decidiu-se, para uma maior proteçao, considerar a alocaçao nestes reservatórios da soma das parcelas decorrentes da distribuiçao do volume de espera de Jupiá com os seus respectivos volumes de espera próprios

Os aproveitamentos de Jaguara, Volta Grande e Porto Colômbia, por serem a fio d'água, têm a proteçao de suas restriçoes exercida pela operaçao dos reservatórios de Furnas e Mascarenhas de Moraes, os quais possuem restriçoes próprias compatíveis com as dos referidos aproveitamentos.

Foram levantadas alternativas de alocaçao de volumes de espera, no sistema de reservatórios a montante de Jupiá, correspondentes a vários tempos de recorrência. Foi feita uma avaliaçao dos impactos energéticos no Sistema Interligado Sul/Sudeste, decorrente da adoçao de cada alternativa, com a finalidade de se obter indicadores significativos, tais como· riscos de déficit, custos de geraçao térmica e de déficits e probabilidades de enchimento dos reservatórios no final da estaçao chuvosa. A alternativa aprovada para a estaçao chuvosa 1995/1996 para proteçao da restriçao de Jupiá corresponde a um tempo de recorrência de 35 anos, nao se alterando em relaçao aos últimos anos

O volume útil total desses reservatórios a montante de Itaipu é da ordem de 98 bilhoes de metro cúbicos, dos quais sao reservados cerca de 20% para volume de espera, durante a estaçao chuvosa, correspondente aos meses de dezembro a abril. Este valor se reduz nos meses de maio a novembro pois, neste período, só estao alocados volumes de espera nos reservatórios da bacia do rio Paranapanema.

4.5 Regras de Operaçao

No caso da bacia do rio Paraná, deve-se destacar a existência de dois tipos de reservatórios quanto à natureza de suas operaçoes de controle de cheias:

- reservatórios para a operaçao integrada na bacia;
- reservatórios para a operaçao isolada na bacia.

Os reservatórios de Camargos e de Barra Bonita, devido às suas localizaçoes e aos seus recursos fisicos, sao considerados reservatórios para a operaçao isolada de controle de cheias, cujo único objetivo direto é a proteçao de suas restriçoes próprias, da mesma forma que os reservatórios da bacia do rio Paranapanema.

Os demais reservatórios a montante de Jupiá operam visando a proteçao nao só de suas restriçoes próprias como também da restriçao de Jupiá. Estes reservatórios compoem o sistema de reservatórios para a operaçao integrada de controle de cheias da bacia do rio Paraná.

Para efeito de uma operaçao integrada de controle de cheias para a proteçao da restriçao de Jupiá sao considerados os seguintes subsistemas: Paranaíba; Grande; Ilha Solteira/Três Irmaos e Tietê. Estes subsistemas foram divididos em segmentos Quando a afluência natural ao sistema até Jupiá ultrapassa a sua descarga de restriçao, os volumes de espera dos subsistemas passam a ser utilizados, de maneira conjugada, mantendo-se a defluência de Jupiá na sua restriçao. A seqüência de utilizaçao dos subsistemas procura se aproximar de um enchimento em paralelo, por segmentos, dos volumes de espera do sistema.

Os volumes de espera a serem alocados tiveram sua evoluçao discretizada em patamares semanais

Quando os reservatórios encontram-se com seus armazenamentos inferiores ao nível meta, devem ser utilizados os "Diagramas de Operaçao Normal", que em funçao da previsao de vazao afluente e do volume vazio disponível indicam as defluências necessárias para atingir os níveis de volume de espera. Desta forma, pode-se antecipar o início da evoluçao da vazao defluente até o valor de sua restriçao, evitando-se com isto as rápidas variaçoes das defluências, que nem sempre sao possíveis devido à limitaçao das taxas de máxima variaçao diária.

Se a afluência natural ao sistema até Jupiá for maior que a sua descarga de restriçao, mesmo existindo volume de espera no sistema, deverá ser sempre consultado o Diagrama de Operaçao em Emergência do Sistema Equivalente em Jupiá, para saber se ainda é possível manter-se a defluência deste aproveitamento na sua restriçao ou se a mesma deverá ser rompida. Para se obter esta

defluência do diagrama de Jupiá deve-se dispor dos dados da afluência natural verificada e do volume de espera disponível no sistema para Jupiá.

Na fase da operaçao em tempo real funciona uma Coordenaçao Operacional para Controle de Cheias, a qual é exercida pelo CNOS - Centro Nacional de Operaçao de Sistemas da ELETROBRAS, cujas principais atribuiçoes sao.

- coordenar a operaçao integrada dos reservatórios durante o período especificado, aplicando as regras de operaçao aprovadas;
- coordenar o programa de defluências e a seqüência de enchimento e deplecionamento dos reservatórios em funçao do estado hidráulico do sistema;
- garantir facilidades e a confiabilidade na troca de informaçoes de dados hidráulicos e hidrológicos entre as empresas envolvidas.

5. Análise da Experiência Operativa

A partir de 1977 o setor elétrico brasileiro começou a incorporar, de forma sistematizada, os estudos de controle de cheias no planejamento e programaçao da operaçao dos reservatórios dos Sistemas Interligados Sul/Sudeste e Norte/Nordeste Inúmeros eventos de cheias significativas ocorreram ao longo destes anos , em várias bacias que permitiram avaliar o desempenho da estratégia de controle de cheias utilizada pelo GCOI. Nesta direçao, selecionamos o ano de 1992, que apresentou ao longo do seu transcurso, vários eventos significativos de cheias em diversas regioes brasileiras, particularmente para a bacia do alto rio Paraná. Por oportuno, devido a indivisibilidade da bacia, incluímos, também, uma análise resumida da operaçao dos reservatórios do rio Iguaçu, bem como suas implicaçoes com a operaçao hidráulica realizada a jusante de Itaipu nos meses de maio e junho de 1992.

5.1 Operaçao de Controle de Cheias na Bacia do Alto Paraná: Jan/Fev - 1992

Chuvas intensas e de longa duraçao verificadas na regiao Sudeste a partir da 2ª quinzena de janeiro de 1992, decorrentes de uma frente estacionária durante quase dez dias, provocaram cheias generalizadas na bacia do Alto Paraná, mais notadamente nas cabeceiras do rio Grande. A precipitaçao total neste mês de janeiro chegou a alcançar até 200% da média histórica em alguns postos da cabeceira do rio Grande.

Na usina de Camargos, no alto rio Grande, em 23.01.92 ocorreu a maior cheia de um histórico de 60 anos registrado neste local, no valor de 1 630 m3/s. A liberaçao de uma defluência máxima de 1 170 m3/s em Camargos evitou a destruiçao de uma ponte na estrada BR-265, embora tenha causado uma interrupçao temporária no trânsito.

Este abatimento da cheia efetuado por Camargos nao foi suficiente para evitar danos à localidade de Ribeirao Vermelho, pois só as vazoes incrementais, nao controladas pela operaçao do reservatório, chegaram a atingir 4.500 m3/s, muito acima da restriçao da cidade, 1.100 m3/s.

Para os demais reservatórios da cascata a operaçao de controle de cheias realizada foi bastante eficiente.

No reservatório de Furnas, em 23.01.95, foi registrada a vazao média diária mais elevada do histórico de 62 anos: 9.000 m3/s. Apesar deste quadro desfavorável, as vazoes defluentes foram totalmente controladas, atingindo-se a restriçao de defluência (4.000 m3/s) apenas a partir de 26 de janeiro, conforme mostrado no Anexo 4

O sucesso da operaçao de controle de cheias dos reservatórios da bacia do rio Grande (Furnas, M Moraes, Marimbondo e Agua Vermelha), permitiu que fossem evitados os seguintes prejuízos:

- inundaçao da usina açucareira de Passos,
- interrupçao do tráfego de balsa em Sao Joao Batista do Glória;
- paralisaçao do tráfego na ponte da BR-050 no trecho Uberaba-Ribeirao Preto;
- paralisaçao das atividades extrativas em portos de areia;
- inundaçao da casa de força da usina Mascarenhas de Moraes,
- interrupçao do tráfego da BR-364 na ponte Gumercindo Penteado.

Mais ainda, o controle de cheias no rio Grande evitou que fossem desalojados diversas famílias em áreas ribeirinhas, a perda de culturas agrícolas e a dizimaçao de rebanhos.

Na bacia do rio Paranaiba, o evento mais significativo da estaçao chuvosa ocorreu no dia 11 02 92 , conforme pode ser observado também no Anexo 4. A operaçao de controle de cheias do reservatório de Itumbiara permitiu manter as vazoes defluentes em no máximo 6.750 m3/s, respeitando a restriçao para proteçao da cidade de Itumbiara, que é de 7.000 m3/s.

Apesar das chuvas mais intensas nas bacias dos rios Grande e Paranaíba nao terem ocorrido simultaneamente, no período de 20 de janeiro a 15 de fevereiro, as vazoes naturais levantadas para Jupiá neste período foram expressivas. Em torno do dia 24 de janeiro, logo após a cheia ocorrida no rio Grande, a vazao natural em Jupiá atingiu o valor de 25.400 m3/s, entrando em recessao até 2 de fevereiro Logo após esta data, em funçao do aumento das vazoes no Paranaíba, as vazoes naturais em Jupiá voltaram a subir, alcançando cerca de 24 300 m3/s, conforme apresentado no Anexo 5. Esta cheia em Jupiá está entre as seis maiores de um histórico de 70 anos, em termos de máxima vazao média diária.

Portanto, caso nao houvesse uma eficiente operaçao de controle de cheias nos subsistemas Grande e Paranaíba, bem como do reservatório de Ilha Solteira, as localidades de Três Lagoas, Panorama e Presidente Epitácio, a jusante da usina de Jupiá, sofreriam inundaçoes. A operaçao coordenada realizada permitiu que em ambos os eventos a defluência de Jupiá nao ultrapassasse a restriçao de 16.000 m3/s, significando uma acumulaçao no sistema de reservatórios brasileiros da ordem de 13 bilhoes de metros cúbicos, ou seja aproximadamente 13% de sua capacidade total.

Deve-se destacar no primeiro evento que, para se elevar a defluência em Jupiá, foi necessário que a CESP e a Defesa Civil removessem cerca de 100 famílias residentes nos locais atingidos. Por isso, a vazao defluente foi mantida em 6.500 m3/s até o dia 19 de janeiro, sendo gradativamente aumentada até 15.000 m3/s no dia 27. A partir daí, em funçao da melhoria das condiçoes meteorológicas, a coordenaçao do controle de cheias manteve esse valor de defluência, permitindo o esvaziamento dos volumes de espera ocupados na bacia do rio Grande.

5.2 Operaçao de Controle de Cheias na bacia do Rio Iguaçu : Mai/Jun - 1992

A bacia do rio Iguaçu localiza-se na regiao Sul do país, em grande parte do estado Paraná, tendo também áreas de contribuiçao em Santa Catarina e na República Argentina.

Essa bacia possui certas características que determinam distintos tipos de enchentes ao longo da mesma O trecho conhecido como Alto Iguaçu, a montante da localidade de Porto Vitória, caracteriza-se por declividades pequenas. Neste trecho, os escoamentos evoluem de forma gradual e permitem boas previsoes de vazoes. Por outro lado, no trecho a jusante de Porto Vitória, ocorre um aumento acentuado das declividades, provocando respostas rápidas às precipitaçoes, com reduçao do horizonte de previsao.

As fortes chuvas ocorridas na regiao Sul em maio/junho de 1992 elevaram as vazoes no rio Iguaçu e causaram a segunda maior cheia dos últimos 60 anos. O total de precipitaçao acumulado em maio de 1992 chegou a atingir 500 mm para algumas localidades, valor este cinco vezes superior ao total médio histórico.

Na regiao a montante de Foz do Areia, a vazao máxima registrada na cidade de Uniao da Vitória foi de 3.800 m3/s, causando inundaçoes para as populaçoes ribeirinhas Vale ressaltar que quando da ocorrência deste evento máximo nao havia influência do remanso do reservatório de Foz do Areia naquela cidade, devido ao deplecionamento efetuado

Nesta época, o aproveitamento de Segredo, da COPEL, situado imediatamente a jusante de Foz do Areia, estava em construçao, e propiciou um grande abatimento da cheia, devido a limitaçao de descarga imposta pelos seus dois túneis de desvio. Como conseqüência da grande acumulaçao ocorrida, a ensecadeira da obra de Segredo foi galgada, sendo necessário se implementar diversas medidas emergenciais.

Devido a magnitude da cheia, o volume de espera alocado em Salto Santiago, da ELETROSUL, nao foi suficiente para garantir a vazao de restriçao de 17.000 m3/s na seçao correspondente a usina Julio de Mesquita Filho, da COPEL, ocorrendo a inundaçao desta usina. No entanto, a defluência de Salto Santiago nao ultrapassou a sua descarga de restriçao (19.000 m3/s), evitando a inundaçao dessa usina, fundamental para o atendimento energético da regiao Sul.

Durante o desenrolar da cheia na bacia do rio Iguaçu, por volta das 19 horas do dia 29.05, a ELETROBRAS, que realizava o seu acompanhamento e controle, através do CNOS, em conjunto com a COPEL e ELETROSUL, foi informada pelo Ministério das Relaçoes Exteriores que poderiam ocorrer problemas, em território paraguaio, no rio Paraná a jusante de Itaipu, até a confluência dos rios Iguaçu e Monday (R-11), devido às seguintes restriçoes: