

APLICAÇÃO DO PROGRAMA CAEV NO ACOMPANHAMENTO DA OPERAÇÃO
HIDRÁULICA PARA CONTROLE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO PARANÁ

APPLICATION OF THE CAEV PROGRAM TO THE HYDRAULIC
OPERATION FOR FLOOD CONTROL IN PARANA RIVER BASIN

VINICIUS FORAIN ROCHA
ALCIDES LYRA LOPES
Engenheiros da ELETROBRÁS
Av. Mal. Floriano, 19/21º andar
20080 - Rio de Janeiro - RJ

JORGE MACHADO DAMÁZIO
FERNANDA DA SERRA COSTA
JERSON KELMAN
Pesquisadores do CEPEL
Caixa Postal 2754
20001 - Rio de Janeiro - RJ

RESUMO -- Este trabalho apresenta a aplicação do programa CAEV, baseado na teoria das Condições de Controlabilidade, na solução de um problema ligado a operação de controle de cheias em um sistema multireservatório. O sistema considerado é o existente na bacia do rio Paraná, compreendendo os principais reservatórios a montante da hidrelétrica de Jupia (inclusive). O problema em questão é a falta de critérios para avaliar, durante a operação de controle de cheias, os riscos de rompimento das restrições em situações onde os níveis de volume de espera dos reservatórios se desviam dos níveis previamente recomendados. A solução aqui apresentada com a utilização do programa CAEV permite uma análise de sensibilidade da variação nos riscos de rompimento nestas situações.

ABSTRACT -- This paper presents an application of the CAEV program, based on Controllability Conditions theory, to the solution of a flood control operation problem in a multi-reservoir system. The system considered includes the greatest reservoirs located in Parana river basin, upstream to the Jupia hydroelectric plant. The problem under analysis is the lack of criteria to quantify flood risks during flood control operation, when reservoir levels are different from previously recommended values. The solution approach with the program CAEV allows a sensibility analysis of flood risk variation under these conditions.

INTRODUÇÃO

O sistema hidroelétrico brasileiro, durante as estações chuvosas, além de operar seus reservatórios buscando a maximização da geração de energia, procura efetuar o controle de cheias nos cursos d'água onde estes reservatórios se localizam, devido a existência de diversas restrições de vazões em várias localidades. Baseado na escolha de um determinado tempo de retorno da cheia a ser controlada, são calculados os volumes de espera, ou seja, os volumes vazios a serem alocados em cada aproveitamento para contenção de cheias.

Na bacia do rio Paraná, onde se encontra um grande sistema de reservatórios situados em cascata e em paralelo, conforme a figura 1, existe uma severa restrição de vazão a jusante da usina hidrelétrica de Jupiá, que por ser a fio d'água, não tem espaço para alocação de volume de espera. Logo, o volume vazio necessário para o controle desta restrição tem que ser distribuído pelos reservatórios situados a montante. O problema é mais complexo na medida em que esta distribuição de volumes vazios deve também levar em conta as outras restrições existentes a montante de Jupiá.

A metodologia atualmente utilizada pelo setor elétrico, para a determinação dos volumes de espera na bacia do rio Paraná, é a Curva Volume x Duração, Ming et al (1979), que se caracteriza pela determinação, com um risco prefixado, do volume vazio a ser alocado imediatamente a montante da seção de restrição. Para a distribuição do volume vazio determinado para a restrição a jusante de Jupiá, o critério utilizado é uma partição ponderada deste volume com base nos dados físicos da bacia e dos reservatórios, GTEH (1980), tais como áreas de drenagem e volumes úteis.

Durante a operação de controle de cheias deste sistema, por diversos fatores, pode-se necessitar de um descumprimento da alocação dos volumes de espera recomendados, o que pode significar uma modificação nos riscos previamente assumidos para o controle de cheias.

O setor elétrico, através do Centro de Pesquisa da Eletrobrás, CEPEL, desenvolveu recentemente o programa CAEV, Costa, F.S., Damázio, J.M., Kelman, J. (1990), que aponta as condições necessárias ao controle de cheias num sistema de reservatórios (condições de controlabilidade). Seus resultados indicam, para cada local com restrição de vazão, os riscos associados aos vários níveis de volumes vazios possíveis nos reservatórios situados a montante daquele ponto.

Neste trabalho buscou-se avaliar a aplicação do programa no auxílio à operação de controle de cheias na bacia do rio Paraná, exemplificando com casos reais de operação durante a estação chuvosa.

CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE

Seja um sistema de dois reservatórios, R_2 e R_1 , em série, sendo R_2 o reservatório de montante, com dois postos de controle, P_2 e P_1 , localizados imediatamente a jusante de cada reservatório. O cálculo do volume de espera a ser alocado em cada reservatório e em cada semana deve considerar que existe um mínimo espaço vazio a ser alo-

vão em R_2 , função exclusiva da restrição em P_2 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 uma semana qualquer t , o domínio das soluções possíveis é caracterizado pelas seguintes equações chamadas de condições de controlabilidade:

$$E_1(t) \geq V_1(t) \quad (1)$$

$$E_2(t) \geq V_2(t) \quad (2)$$

$$E_1(t) + E_2(t) \geq V_{1,2}(t) \quad (3)$$

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

Os valores de $V(t)$ servem para definir a região viável para os espaços vazios na semana t . A operação real dos reservatórios deverá ser feita procurando-se manter permanentemente os espaços vazios dentro da região viável.

Em geral, para qualquer sistema multireservatório a região viável será sempre caracterizada por limites inferiores ($V(t)$) para somas de espaços vazios de reservatórios pertencentes a sistemas parciais (Marien, J.L., 1984). Por exemplo, os sistemas parciais do sistema de dois reservatórios em série são: {1}, {2} e {1,2}. Para o sistema da Figura 2 os sistemas parciais são: {1}, {1,2}, {1,3}, {1,2,3}, {2} e {3}. Note que o conjunto {2,3} não é um sistema parcial. Mais ainda, se não houvesse o ponto de controle 3, por exemplo, o conjunto {3} também não seria um sistema parcial. Especificamente para o sistema da Figura 2, (com ponto de controle 3) as condições de controlabilidade são definidas por:

$$E_1(t) \geq V_1(t) \quad (4)$$

$$E_2(t) \geq V_2(t) \quad (5)$$

$$E_3(t) \geq V_3(t) \quad (6)$$

$$E_1(t) + E_2(t) \geq V_{1,2}(t) \quad (7)$$

$$E_1(t) + E_3(t) \geq V_{1,3}(t) \quad (8)$$

$$E_1(t) + E_2(t) + E_3(t) \geq V_{1,2,3}(t) \quad (9)$$

Damázio et al, 1989, mostram que conhecida uma seqüência de afluência ao sistema, os limites inferiores de espaços vazios, $V(t)$, podem ser obtidos para cada sistema parcial por uma formulação re-

cursiva, dada por:

$$VM_u(t) = \max\{V_u(t), \text{maximum}_{v \in s(u)} |VM_v(t)|, \sum_{w \in r(u)} VM_w(t)\} \quad (9a)$$

$$V_u(t-1) = \sum_{i \in u} q_i(t) + \sum_{i \in UP(u)} m_i(t) - M_u + VM_u(t) \quad (9b)$$

calculada para $t = T, T-1, \dots, t_0$, partindo-se sempre de $V_u(t) = 0$, $\forall u$ e onde:

- u é um sistema parcial;
- $q_i(t)$ é a afluência incremental ao reservatório i na semana t , $t_0 - 1 \leq t \leq T$;
- $m_i(t)$ é o limite de defluência mínima do reservatório i
- M_u é o limite de defluência máxima do sistema parcial u , ou seja a restrição para controle de cheias do reservatório mais jusante no sistema parcial u .
- $x^+ = \max\{x, 0\}$
- $UP(u), s(u)$ e $r(u)$ são conjuntos de sistemas parciais associados ao sistema parcial u (ver Damázio et al, 1989, para a definição destes conjuntos).

Cálculo de envoltória

O cálculo dos limites inferiores $V_u(t)$ pela recursão (9) exige o conhecimento perfeito de toda a seqüência futura de afluências ao sistema, o que em geral não existe, seja na época do planejamento da operação para a próxima estação chuvosa, seja durante a operação. A metodologia desenvolvida em Damázio et al, 1989, adota para enfrentar este problema uma técnica típica da chamada "hidrologia sintética" onde o conjunto infinito de possíveis seqüências de afluências é substituído por um conjunto finito de seqüências obtidas por um modelo de geração. Como em geral é impossível ou anti-econômico proteger o sistema para todas as seqüências, a% destas seqüências não serão protegidas, o que corresponde a um tempo de retorno de 100/a anos para alguma inundação. Escolhidas as séries que se deseja garantir, os limites inferiores para os espaços vazios em cada sistema parcial são calculados pela envoltória destes limites calculados pela recursão (9) para cada uma destas séries. Ou seja, as condições de controlabilidade serão definidas por:

$$E_u(t) \geq EV_u(t), \quad \forall u \quad (10)$$

sendo, $EV_u(t)$ o valor da envoltória para o sistema parcial u na semana t calculado por:

$$EV_u(t) = \text{maximum}_s \{V_u^s(t)\} \quad (11)$$

onde $V_u^s(t)$ é o limite inferior para o sistema parcial u na semana t

calculado pela recursão (9) para a série s.

APLICAÇÃO PROPOSTA

O programa CAEV, baseado nas Condições de Controlabilidade, tem como produto a geração de envoltórias de volumes vazios associadas a tempos de retorno, dadas pela equação (11), para cada subconjunto de reservatórios existentes a montante de locais com restrição de vazão. Para se avaliar o risco a que cada ponto com restrição está submetido, deve-se verificar os riscos (tempos de retorno) associados aos volumes vazios de todos os subconjuntos compostos exclusivamente por reservatórios situados a montante daquele ponto.

A operação de controle de cheias na bacia do rio Paraná, realizada pelos reservatórios do sistema hidroelétrico, como já foi mencionado, utiliza os volumes de espera determinados pela metodologia da Curva Volume x Duração. O método de cálculo dos volumes vazios desta metodologia difere-se bastante do contido nas Condições de Controlabilidade. Portanto, não há como comparar os riscos indicados pelo programa CAEV com os da metodologia atualmente adotada.

Porém, face a necessidade de se avaliar a variação do risco as sumido durante a estação chuvosa em algumas situações que levam os reservatórios a se desviarem dos níveis recomendados de volume de espera e pela impossibilidade de se realizar esta avaliação com os critérios atuais da operação de controle de cheias, procurou-se aproveitar as características do programa CAEV para realizar uma análise de sensibilidade quando da ocorrência dos desvios de níveis referidos.

Dado que o programa CAEV indica o risco para qualquer nível de volume vazio, pode-se obter, tanto para a situação recomendada de alocação de volumes como para a situação de desvio, os respectivos riscos associados. Acredita-se que uma comparação destes riscos, através da verificação da razão existente entre os mesmos, permite uma avaliação do impacto gerado pelo desvio. Desta maneira, sempre que se objetivar qualquer operação em que os níveis dos volumes de espera dos reservatórios tenham que ser alterados em relação aos recomendados, a informação da variação dos riscos associados as duas situações serve de subsídio aos órgãos decisores ligados a operação, para optarem pela melhor solução.

EXEMPLOS

Para exemplificar a aplicação proposta, foram selecionados no histórico da operação de controle de cheias na bacia do rio Paraná três casos recentes em que observou-se discrepâncias entre os níveis metas de volumes de espera recomendados para os reservatórios da bacia, e os realmente verificados durante a operação. Nos três casos selecionados, os motivos que geraram a não observância dos níveis metas foram distintos, porém, em todos eles a avaliação proposta pôde ser feita através da aplicação do programa CAEV.

Nas tabelas 1, 2 e 3 são apresentados os riscos indicados pelo programa CAEV tanto para a situação em que os reservatórios es-

tão nos níveis de volume de espera recomendados, associados ao tempo de retorno de 35 anos segundo a metodologia da Curva Volume x Duração, quanto para a situação realmente ocorrida. Ao se indicar o risco máximo de rompimento para cada restrição, buscou-se dentre todos os sistemas parciais compostos exclusivamente por reservatórios a montante da restrição, aquele sujeito ao maior risco. Na presente avaliação foram consideradas as seguintes restrições de vazão nos reservatórios: Furnas (4000 m³/s), Mascarenhas de Moraes (4400 m³/s), Marimbondo (8000 m³/s), Emborcação (5000 m³/s), Itumbiara (7000 m³/s), São Simão (16000 m³/s), Barra Bonita (1800 m³/s) e Jupuíá (16000 m³/s). O número de sistemas parciais envolvendo estes reservatórios e ainda aqueles que não apresentam restrições, Água Vermelha, Ilha Solteira e Promissão foi de 76. As demais usinas não foram consideradas por disporem de reservatórios muito pequenos ou então por serem a fio d'água.

Dezembro de 1989/Janeiro de 1990

Neste período observou-se uma distribuição desigual das chuvas na bacia do rio Paraná, privilegiando a região que drena para o rio Paranaíba. Este fato ocasionou um enchimento dos reservatórios localizados neste rio até os seus níveis recomendados de volume de espera, enquanto que os demais, situados nos rios Grande, Tietê e Paraná permaneceram com volumes vazios adicionais aos recomendados. Como havia então em todo o sistema mais volume vazios que o total recomendado decidiu-se ocupar os volumes de espera dos reservatórios do rio Paranaíba, que com isto evitariam vertimentos indesejáveis energeticamente. Para a avaliação do impacto em termos de risco gerado por essa decisão, escolheu-se o dia 02 de janeiro, já que neste dia, apesar dos volumes dos reservatórios situados no rio Paranaíba estarem acima do recomendado, o volume vazio total a montante de Jupuíá estava praticamente igual ao indicado pelas regras vigentes.

Tabela 1 - Riscos Máximos de Rompimento para cada Restrição em 02.01.1990.

RESTRIÇÃO	FURNAS	M.MORAES	MARIMBONDO	EMBOCÇÃO	ITUMBIARA	S.SIMÃO	B.BONITA	JUPIÁ
Risco máximo (%) para a situação recomendada	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	4,80
Risco máximo (%) para a situação ocorrida	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	6,78	<2,00	<2,00	3,78

Os resultados do programa CAEV listados acima indicam que a ocupação verificada nos volumes de espera dos reservatórios do rio Paranaíba elevou o risco de rompimento da restrição a jusante de Itumbiara para um valor pelo menos três vezes maior que o previamente assumido. Caso se dispusesse destes resultados naquela data e existisse a decisão pela manutenção do risco anteriormente assumido, esta ocupação não teria sido realizada.

Janeiro/Fevereiro de 1991

Entre o fim de janeiro e o início de fevereiro, em função da

necessidade de se rebaixar o nível do reservatório de Ilha Solteira por motivo de obras, resolveu-se reduzir as defluências dos reservatórios a montante daquele, pois esta maneira não haveria a necessidade de se verter água em Ilha Solteira. Porém, como os reservatórios a montante, em sua maioria, já se encontravam próximos dos seus níveis recomendados de volumes de espera, a referida redução de defluências ocasionou uma ocupação dos volumes vazios recomendados. Para a avaliação do impacto desta operação, escolheu-se o dia 5 de fevereiro, que particularmente foi um dia em que o volume vazio alocado no sistema a montante de Jupiá estava próximo do recomendado.

Tabela 2 - Riscos Máximos de Rompimento para cada Restrição em 05.02.1991

RESTRIÇÃO	FURNAS	M.MORAES	MARIMBONDO	EMBORCAÇÃO	ITUMBIARA	S.SIMÃO	B.BONITA	JUPIÁ
Risco máximo(%) para a situação recomendada	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	4,89	4,37	40,13	10,48
Risco máximo(%) para a situação ocorrida	25,16	<2,00	<2,00	<2,00	4,33	<2,00	38,44	10,57

Como o reservatório de Emborcação, diferentemente dos demais, não havia atingido até aquela época seu nível recomendado de volume de espera, ou seja, estava com um volume vazio adicional, os riscos para as restrições situadas no rio Paranaíba, onde aquele reservatório se localiza, mesmo com a ocupação indevida em Itumbiara e São Simão sofreram uma redução. Porém, a ocupação do volume de espera no reservatório de Furnas elevou o risco a que estava sujeita a sua restrição para cerca de doze vezes o valor previamente assumido. Caso se dispusesse destes resultados no decorrer daquela operação de rebaixamento do nível de Ilha Solteira, e se priorizasse a manutenção do risco previamente assumido, como só o risco de rompimento da restrição a jusante de Furnas sofreu uma elevação, rejeitaria-se apenas a ocupação do volume de espera daquele reservatório, liberando-se as demais ocupações por não implicarem em acréscimo de risco em nenhuma das demais restrições existentes na bacia.

Março de 1991

Entre o final de março e o início de abril ocorreu uma cheia significativa na bacia do rio Paraná. Porém, antes do início da cheia, que começou por volta do dia 21 de março, já por volta do dia 5, os reservatórios desta bacia, em sua maioria, ocupavam os volumes vazios recomendados sem razões ligadas a operação de controle de cheias. Naquela ocasião, pelas tendências hidrológicas e condições meteorológicas vigentes, passou-se a acreditar que não ocorreriam mais cheias significativas até o final da estação chuvosa, resolvendo-se priorizar a operação energética antecipando-se o reenchimento dos reservatórios. A fim de avaliar se tal ocupação indevida gerou algum incremento no risco para o controle de cheias, verificou-se o dia 08 de março, em que o volume vazio total a montante de Jupiá deveria estar com cerca de 2,3 km³ a mais que o observado, segundo as regras de operação vigentes.

Pelos resultados apresentados, observa-se que, apesar da referida ocupação, não verificou-se nenhuma variação nos riscos para o controle de cheias das restrições consideradas. Sendo assim, conclui-se que o estado inicial dos reservatórios anteriormente a cheia não alterou o risco previamente assumido.

Tabela 3 - Riscos Máximos de Rompimento para cada Restrição em 08.03.1991

RESTRIÇÃO	FURNAS	M.MORAES	MARIMONDO	EMBORCAÇÃO	ITUMBIARA	S.SIMÃO	B.BONITA	JUPIÁ
Risco máximo(%) para a situação recomendada	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00
Risco máximo(%) para a situação ocorrida	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00

CONCLUSÃO

Os resultados acima apresentados demonstram que, apesar de ter sido utilizado um método de cálculo para os riscos de rompimento das restrições que difere substancialmente daquele associado aos volumes de espera recomendados, é possível se utilizar as informações dos riscos obtidos pelo programa CAEV, para as situações recomendadas e as de desvios, para se conhecer o grau de modificação no risco que uma determinada programação de operação poderá produzir.

A aplicação do programa CAEV no acompanhamento da operação hidráulica, através da indicação das modificações que ocorrem nos riscos associados ao controle de cheias naquelas situações onde os níveis dos reservatórios diferem dos níveis recomendados, representa apenas uma forma de utilização da teoria das condições de controlabilidade. Esta teoria tem um potencial maior nesta área, sendo possível também sua aplicação na determinação dos volumes de espera a serem recomendados e na definição das regras operativas de controle de cheias.

REFERÊNCIAS

- COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., KELMAN, J. (1990), Condições de controlabilidade de sistemas de reservatórios para controle de cheias, Manual do usuário do programa CAEV1, relatório técnico CEPEL nº 272/90.
- DAMÁZIO, J.M., MARIEN, J.L., PEREIRA, M.V.F., KELMAN, J., COSTA, F.S. (1989), Condições de controlabilidade de sistemas de reservatórios para controle de cheias e seu uso na operação de sistemas com múltiplos usos, relatório técnico CEPEL nº 036/89.
- GTEH (1980), Determinação de volumes de espera para controle de cheias nos reservatórios da bacia do rio Paraná, Subcomitê de Estudos Energéticos, Grupo Coordenador para Operação Interligada, ELETROBRÁS.

MARIEN, J.L. (1984), Controllability conditions for reservoir flood control systems with applications. Water Resources Research, v. 20, n.1, p.1477-1488.

MING, L., BARRETTO, L.A.L., LOPES, A.L., GONTIJO, E.A., KONISHI, S. (1979), Prevenção de cheias em reservatórios do sistema interligado. In: V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo I, Produção Hidráulica.

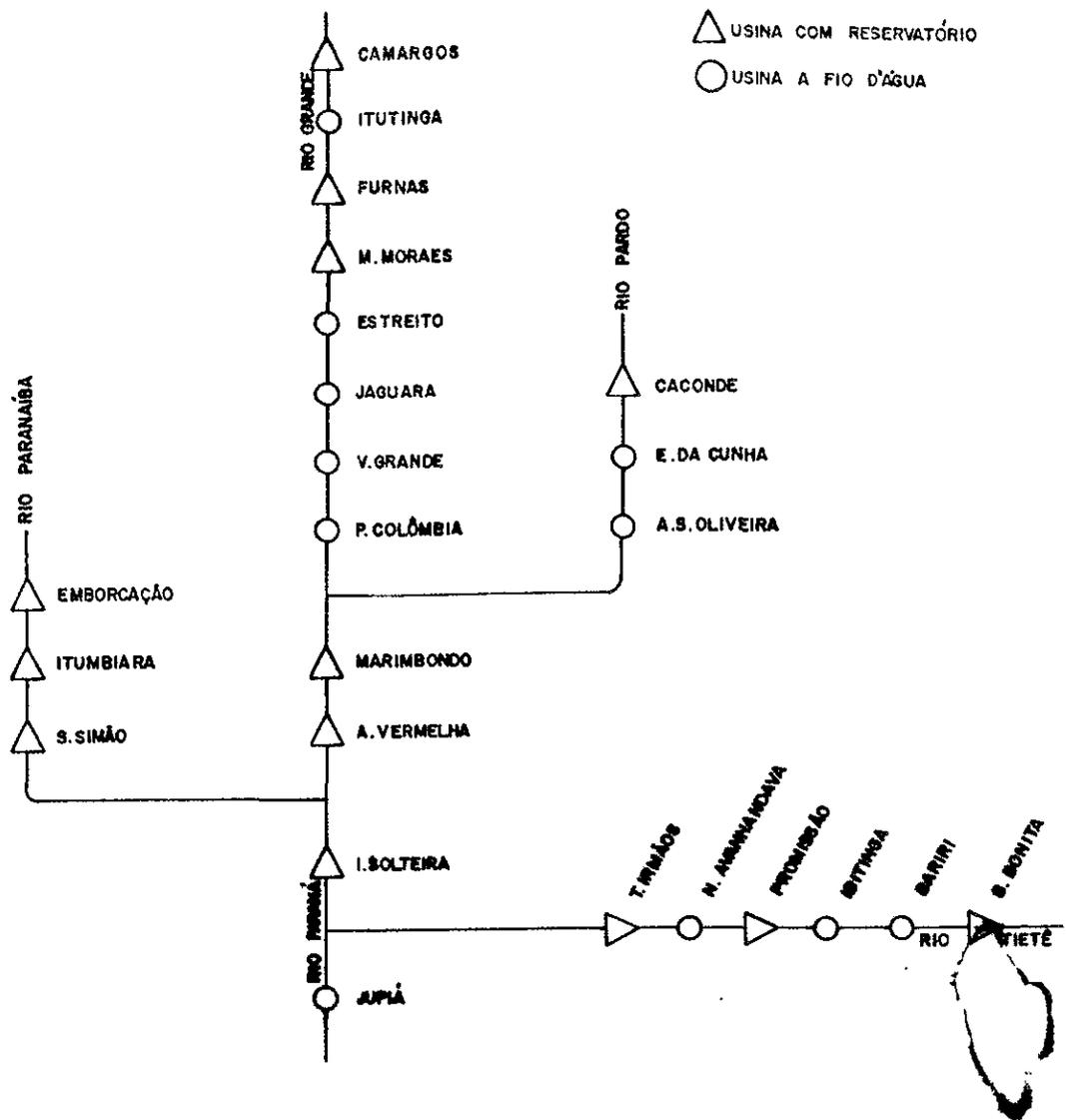


Figura 1: Topologia dos Reservatórios na Bacia do Rio Paraná

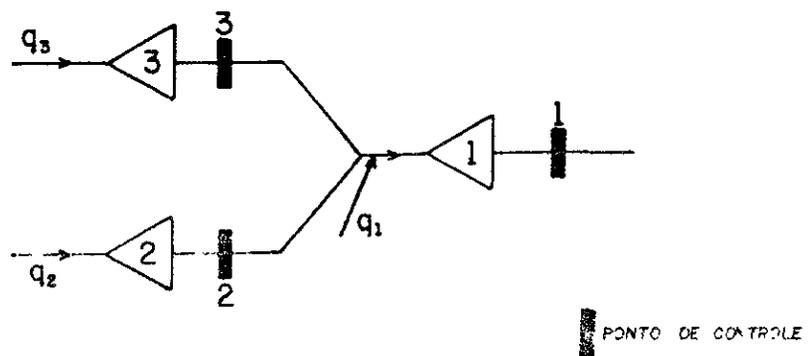


Figura 2: Sistema com Três Reservatórios