



**GRUPO IX  
OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)**

**PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO PARA CONTROLE DE CHEIAS EM SISTEMAS  
HIDROELÉTRICOS – MODELO SPEC**

**Fernanda da Serra Costa  
CEPEL**

**Jorge Machado Damázio  
CEPEL**

**Vinicius Forain Rocha\*  
ONS**

**Angela de Oliveira Ghirardi  
COPPETEC**

**RESUMO**

Este artigo apresenta os principais aspectos metodológicos e de implementação do sistema computacional SPEC – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias, desenvolvido no CEPEL para apoio aos Estudos de Prevenção de Cheias realizados no âmbito dos Planos Anuais de Operação dos Sistemas Interligados do Setor Elétrico brasileiro. Apresenta-se ainda uma aplicação na bacia do rio Paraná.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Planejamento da Operação – Controle de Cheias – El Niño

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O planejamento da operação do Setor Elétrico tem como um de seus objetivos a coordenação cuidadosa da operação do sistema hidráulico de reservatórios do setor, de forma evitar-se desperdícios, minimizando os riscos de geração térmica ou de déficits de suprimentos nos sistemas interligados. Esta coordenação inclui a utilização, durante a estação chuvosa, de parte da capacidade dos reservatórios como volumes de espera para a redução de danos causados por cheias de grande porte em áreas a jusante dos reservatórios. A manutenção destes volumes implica numa redução das disponibilidades energéticas e no aumento do risco de geração térmica futura e déficits de suprimento. Portanto a contribuição dada pelo Setor Elétrico para o controle de cheias tem uma característica conjuntural.

A cada ano a alocação de volumes de espera a ser utilizada tem como base estudos de prevenção de cheias, onde os riscos de geração térmica futura e de déficit de suprimento são calculados por simulações da operação dos sistemas interligados sob diferentes hipóteses de alocação de volume de espera correspondentes a tempos de retorno de cheias selecionados. Com o objetivo de apoiar os Estudos de Prevenção de Cheias realizados no âmbito do GCOI e dos seus Planos Anuais de Operação dos Sistemas Interligados do Setor Elétrico Brasileiro o CEPEL vem desenvolvendo diversos programas computacionais, que integram o sistema SPEC (Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias). Este sistema tem como foco principal a análise de sistemas multireservatórios/multipontos-de-controle-de-Cheias, situados em bacias hidrográficas cujas hidrologias apresentam variações intranuais (sazonalidade). Na sua mais recente versão, o sistema incorpora facilidades para investigação e consideração da influência da situação da oscilação plurianual da circulação geral da atmosfera no Pacífico conhecida como ENSO (El Niño-Oscilação Sul). O sistema agrega um conjunto de funções de modelagem estocástica e geração de séries sintéticas de aflúências (DIANA), uma função para cálculo de curvas de volumes de espera para reservatórios equivalentes (CAEV), e outra para a desagregação destas em curvas individualizadas para cada reservatório do sistema (VESPOT), além da função ENSOCLAS para consideração da influência do fenômeno ENSO.

Este artigo apresenta os principais aspectos metodológicos e de implementação do sistema

\* OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, r. Real Grandeza nº 219, bl. B, sl. 507, Botafogo – CEP 22281-031, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, e-mail vforain@ons.org.br

computacional SPEC e uma aplicação na bacia do Paraná.

## 2.0 – METODOLOGIA ADOTADA

Como método de análise, o sistema adota a metodologia das condições de controlabilidade (1), aprovada pelo GTHO/GCOI para Estudos de Prevenção de Cheias em sistemas multireservatórios. Nesta metodologia, descrita em detalhes em (2) e (3), a incerteza hidrológica está representada através do uso de conjuntos de séries sintéticas de aflúências diárias ao sistema, obtidas pelo ajuste de um modelo estocástico ao histórico de aflúências, considerando-se neste ajuste, a fase da Oscilação Sul (El Niño, La Niña ou normal).

A alternativa de proteção contra cheias que o setor elétrico oferece ao vale, é definida pelo usuário, sob a forma de um vetor de tempos de retorno para cada ponto de controle, ao qual associa-se também uma vazão máxima. O sistema de reservatórios analisado é decomposto em sistemas parciais, representado-se cada sistema parcial por um reservatório equivalente. Para cada reservatório equivalente calcula-se uma curva-guia superior para toda a estação chuvosa (curva de volume de espera), tomada como a envoltória de trajetórias críticas, sob o ponto de vista do controle de cheias, da evolução do seu volume total armazenado durante a estação chuvosa. Para o cálculo das envoltórias, utiliza-se apenas trajetórias críticas correspondentes à séries sintéticas previamente escolhidas para serem protegidas dentre as séries do conjunto correspondente à situação da ENSO analisada. O número de séries a serem protegidas para cada um dos reservatórios equivalentes é proporcional à proteção desejada para a sua restrição (tempo de retorno), enquanto que a escolha de quais séries serão protegidas é feita de forma a otimizar uma função de interesse energético.

O problema da desagregação espacial de curvas de volumes de espera de reservatórios equivalentes em curvas individualizadas para cada reservatório do sistema é formulado como um problema linear estocástico com função objetivo refletindo interesses da geração de energia elétrica. Como técnicas de solução faz-se uso da decomposição de Benders e algoritmos de fluxo em redes, utilizando-se as envoltórias dos sistemas parciais para acelerar a convergência do método.

### 2.1 - Critério para escolha de séries a serem protegidas

O critério utilizado no cálculo das envoltórias para a escolha de séries a serem protegidas deve considerar o ponto de vista da geração de energia elétrica.

Para a escolha de séries a serem protegidas, o sistema apresenta dois critérios: minimização do maior valor de volume de espera e maximização da probabilidade de recuperação dos volumes de espera. Estudos de simulação executados em (6) indicaram o segundo critério como adequado para bacias onde existe uma estação seca, sendo desejável iniciá-la com os reservatórios cheios, ficando o primeiro critério para ser usado onde há necessidade de alocação de volume de espera durante todo o ano.

### 2.2 - Função objetivo para desagregação espacial

Para a desagregação espacial das envoltórias o sistema possui três alternativas de função objetivo: alocação proporcional, alocação por faixas e prioridades e alocação considerando o potencial de exposição à cheias.

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

Na segunda função objetivo atribui-se prioridades de deplecionamento aos reservatórios e divide-se os seus volumes úteis em faixas. Utiliza-se então uma função objetivo aonde as alocações de volume de espera nos reservatórios são penalizadas diferentemente conforme a faixa em que cada um se encontra e, no caso de mesma faixa, conforme as prioridades de deplecionamento. Deste modo pode-se, por exemplo, definir as faixas e prioridades de forma a privilegiar a alocação de volumes de espera a montante maximizando assim a energia armazenada no sistema. Esta é uma boa alternativa para o início da estação chuvosa, mas para o final da estação chuvosa pode-se comprometer o reenchimento do sistema. Uma solução seria implementar a possibilidade de adotar-se diferentes prioridades para o início e final da estação chuvosa. Para isto seriam necessários estudos com simulações do sistema e a definição de critérios para análise dos resultados destas simulações de forma a definir as prioridades.

Na terceira função objetivo parte-se da regra empírica tradicionalmente usada para repartir os volumes de espera das envoltórias pelos reservatórios do sistema, considerando-se alocações proporcionais aos potenciais de exposição a cheias de cada um deles (5), e procura-se soluções no seu entorno. Para tal considera-se prioridades de deplecionamento de

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

### 3.0 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema incorpora a função ENSOCLAS para a classificação dos registros históricos de aflúncias aos sistemas, segundo a influência da situação da oscilação no regime de cheias, tendo como base análises conjuntas de séries de medições no Pacífico (temperatura da superfície do mar, de velocidade do vento à superfície, diferenças de pressão) e índices de intensidade de cheias. Na sua versão atual a função considera a sequência de valores padronizados do índice SOI (South Oscillation Indice) tendo convencionado-se considerar para a bacia do Paraná situação La Niña/El Niño sempre que em algum semestre entre junho e setembro em pelo menos 3 meses o índice superar/não\_superar 1/-1 e em um quarto mês o índice superar/não\_superar 0.6/-0.6. De acordo com (4) esta classificação apresenta na bacia do rio Paraná a tendência de uma maior frequência de cheias durante estações chuvosas correspondentes à situação de El-Niño, enquanto que durante estações La-Niña, é menor esta frequência.

Para a modelagem estocástica, o sistema utiliza o modelo DIANA, desenvolvido pelo CEPEL para Estudos de Cheias, aprimorado para permitir a modelagem e geração de séries sintéticas condicionadas à classificação da situação da oscilação ENSO, conforme obtido na função ENSOCLAS. O modelo DIANA permite a geração de até 12000 séries sintéticas e pode ser usado de forma univariada (só para um posto), ou multivariada (para até 30 postos), sendo composto de 5 programas: AUXAJUS: ajuste automático da taxa de recessão característica da bacia modelada, EPN: estimador pontual, EEN: estimador espacial, GEP: gerador, e COMPARA: avaliador do desempenho do modelo.

O sistema disponibiliza a função CAEV que permite considerar sistemas de reservatórios com mais de um ponto de controle de cheias e/ou com limitações de vazões mínimas. A função CAEV promove automaticamente a decomposição do sistema analisado em sistemas parciais, calcula trajetórias críticas do conjunto de s.p. para todas as séries sintéticas geradas pela função GEP, e seguindo alternativa de proteção (tempo de retorno em cada ponto de controle de cheia no sistema) e critério energético (minimização da perda de potência disponível durante a estação chuvosa, ou, maximização da probabilidade de enchimento

completo do sistema ao final da estação chuvosa) definidos pelo usuário, escolhe as séries sintéticas a serem protegidas e obtém as envoltórias de cada sistema parcial.

A função VESPOT executa a otimização da distribuição espacial e temporal dos volumes de espera, fornecendo para cada reservatório do sistema a evolução dos volumes de espera ao longo do ano. As envoltórias obtidas na função CAEV são utilizadas pela função VESPOT para a obtenção das curvas de volumes de espera de cada reservatório, segundo a função-objetivo desejada (alocação proporcional, por faixas e prioridades ou aprimoramento da alocação pela regra empírica).

A tabela 1 apresenta as funções do sistema e a figura 1 ilustra a troca de informações entre as diversas funções do sistema.

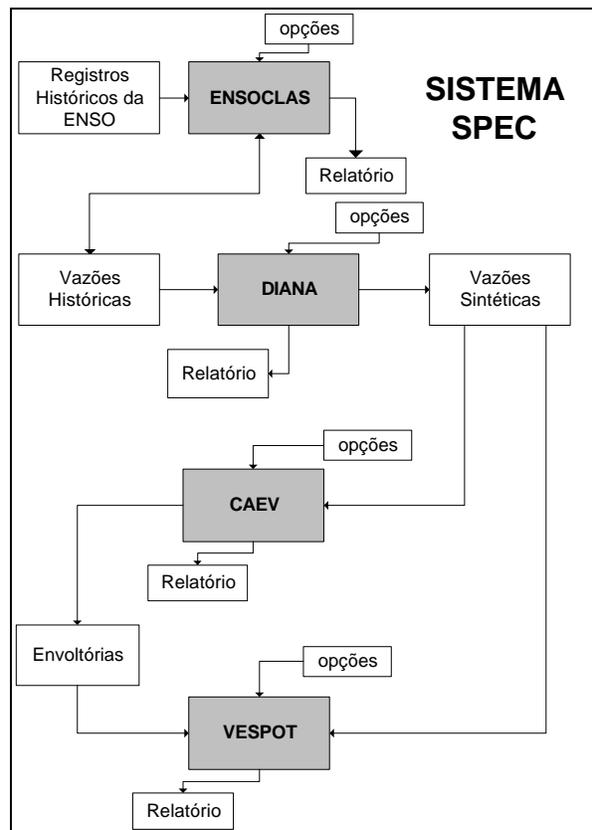


FIGURA 1 - SISTEMA SPEC

### 4.0 – APLICAÇÃO

Para exemplificar o uso do sistema SPEC, apresenta-se o caso do sistema de 15 aproveitamentos da bacia do rio Paraná até a UHE Jupuí representado na figura 2 cujo planejamento da operação para o controle de cheias durante a sua estação chuvosa (novembro a

abril) é feita de forma integrada. Este foi um dos sistemas estudados pelo GCOI no ciclo anual de planejamento para o período 98/99.

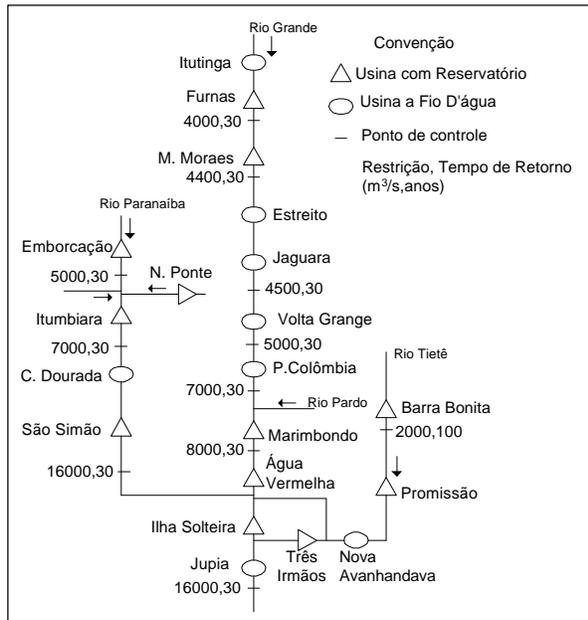
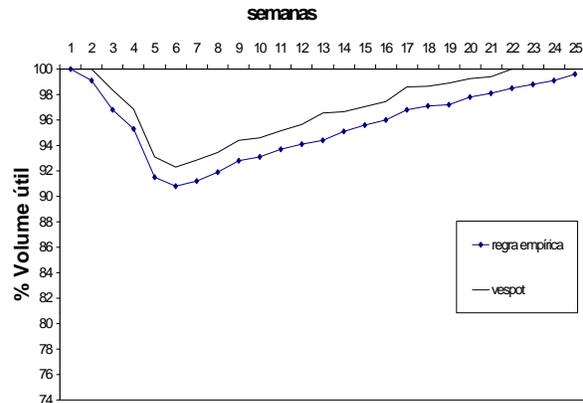


FIGURA 2 – SISTEMA DE APROVEITAMENTO DA BACIA DO RIO PARANÁ ATÉ JUPIÁ

Utilizando o critério da sequência de valores padronizados do índice SOI (South Oscillation Index) entre junho e dezembro de 1998 a situação macroclimática foi considerada como La Niña. A função DIANA foi então utilizada para gerar conjuntos de 12000 séries condicionadas a que não estávamos numa situação de El Niño, tendo em vista que o número de estações chuvosas do histórico na situação La Niña é de apenas 9 anos.

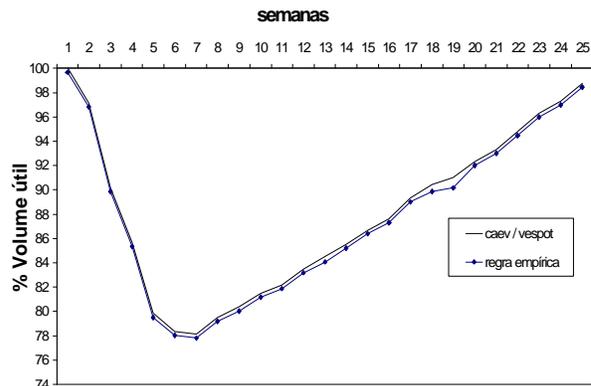
A aplicação da função CAEV ao sistema do Paraná até Jupiá indicou a existência de 108 sistemas parciais, para os quais foram calculadas, utilizando o critério da maximização da probabilidade de reenchimento, envoltórias correspondente a alternativa de proteção definida na figura 2. A figura 3 apresenta a evolução da envoltória ao longo da estação chuvosa para o sistema parcial que engloba todos os reservatórios do sistema. Apresenta também a evolução do total de volumes de espera no sistema após a repartição dos valores da envoltória pelos reservatórios do sistema através da regra empírica tradicional. Podendo-se notar que a regra empírica conduz a totais de volumes de espera mais conservadores.

FIGURA 3 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO TOTAL DE VOLUME DE ESPERA DO SISTEMA



Para a distribuição dos volumes de espera das envoltórias pelos reservatórios do sistema, utilizou-se a função-objetivo que aprimora a alocação da regra empírica. A Figura 4 compara os volumes de espera no reservatório de Furnas com os fornecidos pela distribuição empírica, mostrando um ganho.

FIGURA 4 – ALOCAÇÃO TEMPORAL DE VOLUME DE ESPERA NO APROVEITAMENTO



DE FURNAS

## 5.0 - CONCLUSÃO

O exemplo de aplicação apresentado no item 4 fornece uma visão geral do sistema SPEC desenvolvido no CEPEL para apoio aos Estudos de Prevenção de Cheias. As figuras 3 e 4 mostram que o sistema fornece resultados menos conservadores do que a utilização da regra empírica em uso, ilustrando a praticidade da implementação. Por outro lado, um esforço de investigação, nos moldes do referido no item 2.2, poderá fornecer um função-objetivo mais adequada, capaz de refletir mais explicitamente os objetivos de geração de energia elétrica.

## 6.0 - REFERÊNCIAS

(1) DAMÁZIO, J. M.,; MARIEN, J. L.; PEREIRA, M. V. F., KELMAN, J. e COSTA, F.S, “Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu uso na Operação de Sistemas com Múltiplos Usos”, Relatório Técnico CEPEL DPST-036/89, CEPEL, Rio de Janeiro, 1989.

(2) COSTA, F.S, DAMÁZIO, J. M e KELMAN, J., “Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias – CAEV1, Relatório Técnico CEPEL DPST-272/90, CEPEL, Rio de Janeiro, 1990.

(3) DAMÁZIO, J. M., COSTA, F.S e D’ANGELO A. G. , “Minimização do Impacto Energético da Alocação de Volumes de Espera em Sistemas de Reservatórios”,

Relatório Técnico CEPEL DPP/TEC-245/94, CEPEL, Rio de Janeiro, 1994.

(4) COSTA F.S., DAMÁZIO, J.M, GHIRARD A.O., Incorporação de Tendências Macro-Climáticas na Operação de Controle de Cheias, XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, 1997.

(5)GCOI/SCEN/GTHO, Prevenção de Cheias nos Aproveitamentos Hidroelétricos dos Sistemas Interligados 1997/1998, Rio de Janeiro, 1997.

(6) FRANÇA, E.H.F., CANELLA, S.D., Análise Comparativa entre Possíveis Curvas de Alocação de Volumes de Espera, III Encontro Técnico de Hidrologia Operacional, Itaipava, RJ, 1994.

TABELA 1 – FUNÇÕES DO SISTEMA SPEC

FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
<b>ENSOCLAS</b>	Classificação dos registros históricos de aflúências aos sistemas segundo a situação da ENSO.
<b>MODELO DIANA</b> AUXAJUS EPNP EENP GEP COMPARA	Modelagem Estocástica Ajuste automático da taxa de recessão Estimação pontual Estimação Multivariada Geração de Séries Sintéticas Verificação do ajuste do modelo
<b>CAEV</b>	Representação por reservatórios equivalentes e cálculo de envoltórias.
<b>VESPOT</b>	Obtenção de curvas de volumes de espera individualizadas para cada reservatório do sistema