



SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

GOP - 13  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO IX**  
**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GOP**

**SISTEMA PARA A PROGRAMAÇÃO E OPERAÇÃO EM TEMPO REAL DE SISTEMAS  
HIDRELÉTRICOS BASEADO EM PREVISÃO DE VAZÕES E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE  
RESERVATÓRIOS**

**Paulo Ricardo Laudanna<sup>1</sup>, Carlos Antonio Severino Costa<sup>1</sup>, João Eduardo Gonçalves Lopes<sup>2</sup>,  
Marcelo Augusto Cicogna<sup>3</sup>, Carlos Hirochi Moribe<sup>1</sup>**

**RESUMO**

Esse trabalho apresenta a experiência da *Duke Energy International, Geração Paranapanema* (DEIGP) na especificação e construção de um sistema Previsão/Simulação para suporte à decisão da Programação da Operação e Operação em Tempo Real do sistema hidrelétrico localizado no Rio Paranapanema. A previsão de vazões afluentes às usinas é efetuada pelo modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*). Foram modeladas 22 sub-bacias numa área total de 100 mil km<sup>2</sup>. Estão disponíveis na telemetria da Empresa 32 estações pluviométricas e 12 estações fluviométricas. São consideradas as previsões de chuva divulgadas pelo CPTEC-INPE. Com a previsão de vazões afluentes, em intervalo horário, o simulador hidráulico fornece informações sobre a evolução temporal dos níveis dos reservatórios e vazões defluentes, a partir do conhecimento da situação antecedente dos reservatórios, das gerações programadas, das características dos rios, usinas e reservatórios, bem como das restrições operativas hidráulicas. O sistema, em uso desde janeiro de 2004, agregou um grande valor à cadeia de suporte à decisão da área de operação da DEIGP, permitindo que o planejamento, programação e operação de tempo real trabalhem de forma mais integrada e propiciando elevados ganhos de qualidade, precisão e tempo.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas hidroelétricos, Suporte à decisão, Otimização, Previsão e Simulação.

**1.0 - APRESENTAÇÃO**

Os profissionais do Sistema Elétrico Brasileiro dispõem atualmente de poucas ferramentas para auxílio ao processo de tomada de decisões nas etapas de Programação da Operação e Operação em Tempo Real dos sistemas geradores hidrelétricos. Nesse cenário de falta de recursos, destaca-se a importância do desenvolvimento de ferramentas de previsão de vazões e simulação da operação hidráulica de reservatórios, recursos esses situados em horizonte diário ou semanal, geralmente com discretização horária.

A operação hidráulica de sistemas de reservatórios corresponde ao conjunto de ações de controle da água dos sistemas de reservatórios. A programação da operação visa atender às metas ou limites de níveis e/ou vazões estabelecidos pelo processo de planejamento e programação de despacho centralizado. O processo de operação deve respeitar a coordenação eletro-energética do SIN (Sistema Interligado Nacional), o cronograma de manutenção das máquinas, as falhas na operação das usinas, os dados hidrológicos como, por exemplo, o tempo de viagem entre barragens, o uso múltiplo da água e o controle de cheia.

<sup>1</sup> Duke Energy International Geração Paranapanema,

<sup>2</sup> Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,

<sup>3</sup> Universidade Estadual de Campinas,  
e-mail: prlaudanna@duke-energy.com

Para a execução das atividades inerentes ao processo de operação hidráulica de reservatórios, as áreas de programação, pré-operação, tempo real e pós-operação necessitam dispor de um instrumento que sustente o conhecimento antecipado e detalhado do comportamento da água bem como a decisão da programação e reprogramação de defluência. Uma solução para esse problema pode ser obtida com a criação de um sistema de suporte à decisão formado por um previsor de vazões afluentes e um simulador da operação hidráulica de reservatórios.

## 2.0 - MODELO DE PREVISÃO DE VAZÕES

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes J.E.G., Braga B.P.F. e Conejo J.G.L., e apresentado no *International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling* realizado em Mississippi, U.S.A. e publicado pela *Water Resources Publications* (Lopes et al., 1982). O desenvolvimento do modelo SMAP baseou-se na experiência de aplicação do modelo *Stanford Watershed IV* e do modelo *Mero* em trabalhos realizados no DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Foi, originalmente, desenvolvido para intervalo de tempo diário e, posteriormente, foram apresentadas versões com discretização horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura.

Em sua versão diária, o modelo é constituído de três reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada dia de acordo com o seguinte procedimento (FIGURA 1):

$$\begin{aligned} R_{\text{solo}}(i) &= R_{\text{solo}}(i-1) + P - E_s - E_r - \text{Rec} \\ R_{\text{sup}}(i) &= R_{\text{sup}}(i-1) + E_s - E_d \\ R_{\text{sub}}(i) &= R_{\text{sub}}(i-1) + \text{Rec} - E_b \end{aligned}$$

onde:  $R_{\text{solo}}$ : reservatório do solo zona aerada (mm);  
 $R_{\text{sup}}$ : reservatório da superfície da bacia (mm);  
 $R_{\text{sub}}$ : reservatório subterrâneo z. saturada (mm);  
 $P$ : chuva média na bacia (mm);  
 $E_s$ : escoamento superficial (mm);  
 $E_d$ : escoamento direto (mm);  
 $E_r$ : evapotranspiração real (mm);  
 $\text{Rec}$ : recarga subterrânea (mm);  
 $E_b$ : escoamento básico (mm).

Na versão diária, o modelo é construído por três reservatórios matemáticos.

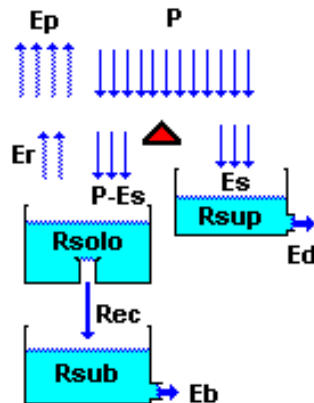


FIGURA 1. Ilustração do modelo diário SMAP.

A configuração inicial do modelo corresponde à atribuição de valores às variáveis de estado no primeiro intervalo de tempo, da forma:

$$\begin{aligned} R_{\text{solo}}(0) &= T_{\text{uin}}/100 * S_{\text{tr}} \\ R_{\text{sup}}(0) &= S_{\text{upin}} \\ R_{\text{sub}}(0) &= E_{\text{bin}} / (1 - 0,5^{(1/Kkt)}) / A_d * 86,4 \end{aligned}$$

onde:  $T_{\text{uin}}$  = teor de umidade inicial (%);  
 $E_{\text{bin}}$  = vazão básica inicial ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  
 $S_{\text{upin}}$  = vazão superficial inicial ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  
 $A_d$  = área de drenagem ( $\text{km}^2$ );  
 $Kkt$  = constante de recessão esc. básico (dias).

O modelo é composto de cinco funções de transferência. A separação do escoamento superficial é baseada no método do SCS (*Soil Conservation Service do U.S. Dept. Agr.*).

**Escoamento** 1- Se  $(P > A_i)$  Então  $S = S_{\text{tr}} - R_{\text{solo}}(i-1)$   
 $E_s = (P - A_i)^2 / (P - A_i + S)$   
 Caso contrário  $E_s = 0$

**Evapotranspiração** 2- Se  $((P - E_s) > E_p)$  Então  $E_r = E_p$

$$\text{Caso contrário } Er = (P - Es) + (Ep - (P - Es)) * Tu$$

**Recarga do aquífero** 3- Se  $R_{solo}(i-1) > (Capc/100 * Str)$  Então  $Rec = Crec/100 * Tu * (R_{solo}(i-1) - (Capc/100 * Str))$   
 Caso contrário  $Rec = 0$

**Escoamento Direto** 4-  $Ed = R_{sup}(i-1) * (1 - 0,5^{(1/K2t)})$

**Escoamento de Base** 5-  $Eb = R_{sub}(i-1) * (1 - 0,5^{(1/Kkt)})$

onde:  $Tu = R_{solo}(i-1) / Str$   
 $Ep = \text{Evaporação potencial (mm/dia – medidas padrão de Tanque classe A)}$

Os parâmetros de calibração do modelo são descritos a seguir:

- $Str$  - capacidade de saturação do solo (mm);
- $K2t$  - constante de recessão do escoamento superficial (dias);
- $Crec$  - parâmetro de recarga subterrânea (%);
- $Ai$  - abstração inicial (mm);
- $Capc$  - capacidade de campo (%);
- $Kkt$  - constante de recessão do escoamento básico (dias).

As constantes de recessão,  $Kkt$  e  $K2t$ , são associadas à duração do intervalo, medido em dias, no qual a vazão básica e superficial cai a metade de seu valor (não considerando nova recarga nesse período). O eventual transbordamento do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

Finalmente, o cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q = (Es + Eb) * Ad / 86.4$$

**CALIBRAÇÃO: 30 a 120 dias de dados de vazão média diária, incluindo eventos de cheia.**

Os dados de entrada do modelo são os totais diários de chuva e o total diário médio do período de evaporação potencial (tanque classe A). Para calibração são necessários de 30 a 120 dias de dados de vazão média diária, incluindo eventos de cheia. É utilizado um coeficiente de ajuste da chuva média da bacia ( $P_{cof}$ ) que deve ser calculado em função da distribuição espacial dos postos.

## 2.1 Metodologia de Calibração

A calibração de modelos Chuva-Vazão tradicionalmente era efetuada de forma manual, através de "tentativa e erro". Este método requer muita experiência do hidrólogo e constitui um processo trabalhoso e subjetivo. Por outro lado, apresenta a vantagem do acompanhamento total do hidrólogo na determinação de cada parâmetro, onde toda sua experiência é passada ao processo.

Atualmente, têm-se utilizado métodos matemáticos de otimização para calibração automática dos parâmetros do modelo, de forma a facilitar o trabalho e diminuir a subjetividade do processo manual. Infelizmente, as facilidades fornecidas por esses métodos, em geral, acarretam a falta de acompanhamento do hidrólogo na calibração passo a passo dos parâmetros, impedindo o desenvolvimento da sua sensibilidade, e com isso, diminuindo a confiabilidade dos resultados.

Utilizou-se, nesse trabalho, uma calibração semi-automática para aproveitar as vantagens dos dois métodos, de forma a permitir boa calibração e colocar os modelos ao alcance de hidrólogos menos experientes. Uma inovação foi a calibração automática dos coeficientes de representação espacial dos postos pluviométricos que, partindo-se dos valores obtidos pelo método de Thiessen, ajustou-se de modo automático seus coeficientes, após obter-se um primeiro ajuste dos parâmetros. Dos seis parâmetros do modelo SMAP, foram utilizados apenas três na calibração automática. As faixas de variação desses parâmetros, obtidas na aplicação do modelo em bacias de variadas regiões brasileiras, foram as seguintes:

100	< Str	< 2000
0.2	< K2t	< 10
0	< Crec	< 100

O parâmetro  $Kkt$  não apresentou-se sensível ao modelo.

O parâmetro " $Kkt$ " (constante de recessão do escoamento básico) não apresentou sensibilidade a várias funções objetivo utilizadas, indicando que seu ajuste deve ser feito de forma manual, após ter-se atingido um ajuste razoável dos três parâmetros mencionados anteriormente. Esse ajuste deve ser feito observando-se no hidrograma os trechos de recessão. ( $30 < Kkt < 180$ )

Os parâmetros " $Ai$ " e " $Capc$ " podem ser obtidos através de características da cobertura vegetal e do tipo de solo, respectivamente:

$Ai =$	2,5 mm Campo	$Capc =$	30 % Arenoso
--------	--------------	----------	--------------

OBS:

A calibração automática pode diminuir a confiabilidade dos resultados.

ASSIM A CALIBRAÇÃO SEMI-AUTOM. PODE SER INTERESSANTE POIS UTILIZA UM POUCO DOS DOIS.

3,7 mm	Mata	40 %	Misto
5,0 mm	Floresta densa	50 %	Argiloso

OBS:

A condição inicial é muito importante para a boa previsão do modelo!!!!

## 2.2 Inicialização das Variáveis de Estado

A correta determinação do valor inicial das variáveis de estado do modelo ( $R_{solo}$ ,  $R_{sup}$  e  $R_{sub}$ ), efetuada pelas variáveis Tuin, Supin e Ebin, mostrou-se fundamental para o bom desempenho do modelo. Uma má determinação inicial, mesmo com parâmetros corretos, causa grandes distorções nos resultados do modelo. No uso do modelo SMAP em tempo real, essa configuração inicial das variáveis de estado será o ponto chave na resposta do modelo como bom predictor de vazões.

Recomenda-se iniciar o período de calibração após seqüências de dias secos, pois dessa forma, a umidade do solo e a vazão básica estarão com seus valores baixos. No uso do modelo em tempo real, é necessário um acompanhamento contínuo dessas variáveis.

Para calibração do modelo, o ajuste da configuração inicial das variáveis de estado deve ser feito manualmente com as seguintes recomendações:

- Tuin –( $R_{solo}$ ): Verificar se o valor atribuído está dentro da faixa de variação apresentada na simulação de todo o período (distante dos limites). Observar, também, a aderência do hidrograma no período inicial.
- Ebin –( $R_{sub}$ ): Pode ser atribuída a vazão básica inicial maior ou igual à vazão mínima de todo o período, verificando-se no hidrograma se não existe tendência acentuadamente crescente ou decrescente.
- Supin –( $R_{sup}$ ): Atribuir valor considerando a quantidade de chuva nos dias antecedentes.

Inicializar o modelo considerando 21 dias antecedentes!

No uso em tempo real do modelo SMAP, a inicialização torna-se automática devido ao registro em banco de dados dos valores das variáveis de estado (considerados 21 dias antes). Essa estrutura computacional permite o uso contínuo do modelo sem interrupções. No caso de descolamento entre os hidrogramas observados e calculados, torna-se necessário um novo ajuste manual das variáveis de estado. No caso de interrupção ou falha na telemetria, será necessária nova inicialização, com partida 21 dias antes.

## 3.0 - APLICAÇÃO DO MODELO À BACIA DO RIO PARANAPANEMA

A bacia do Rio Paranapanema tem 60% de sua área medida por doze postos tele-fluviométricos (Figura 2). Os 40% restantes circundam o rio principal que possui dez usinas hidrelétricas, sendo três delas com reservatórios de grande acumulação, alterando o regime natural do rio.

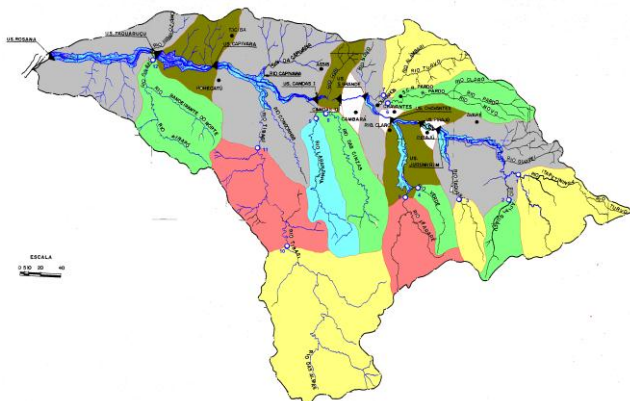


FIGURA 2. Mapa da bacia do rio Paranapanema

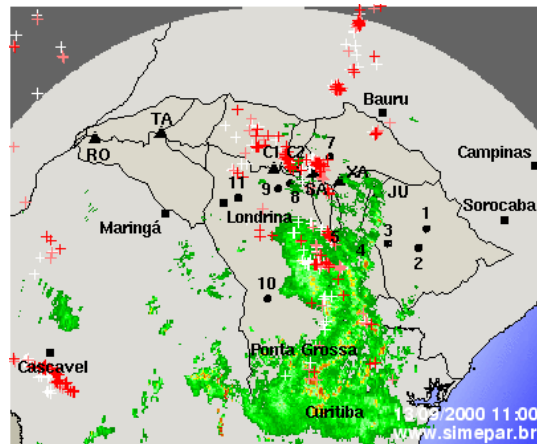


FIGURA 3. Imagem do Radar Meteorológico

Dessa forma a bacia foi dividida em vinte e duas sub-bacias, onde serão realizadas previsões de vazão através do modelo chuva-vazão SMAP. Devido ao tamanho das sub-bacias a previsão será feita em intervalo diário com posterior desagregação em vazões horárias. A bacia dispõe de trinta e duas estações tele-pluviométricas e um radar meteorológico com cobertura total da bacia operado pelo Simepar (Figura 3). O CPTEC/INPE disponibiliza previsão quantitativa de chuva com horizonte de 15 dias no modelo Global e 5 dias no modelo ETA. Para o primeiro dia são incorporados os dados horários de chuva observada da telemetria corrigindo em tempo real a previsão de chuva.

Na figura 4, apresenta-se a tela do programa SMAP. É possível visualizar o ajuste nos últimos 21 dias seguido da previsão sete dias à frente. Essa visualização conjunta do período observado recente e da previsão aumenta a confiabilidade dos resultados e permite correções manuais na configuração inicial das variáveis de estado, quando existe descolamento dos hidrogramas.

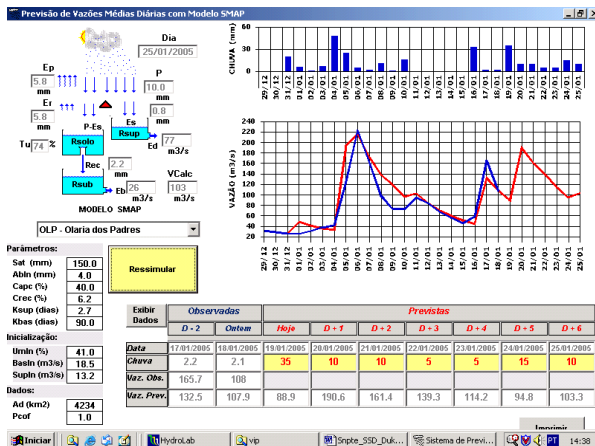


FIGURA 4. Tela de Previsão do Modelo

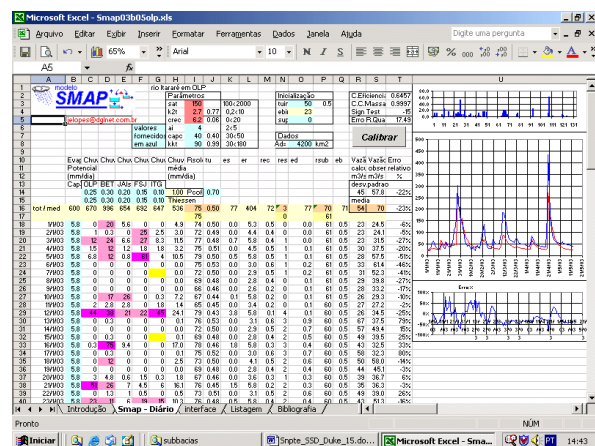


FIGURA 5. Tela de Calibração do Modelo

Para a calibração do modelo desenvolveu-se em planilha Excel com utilização da ferramenta de otimização Solver (Figura 5). O evento de janeiro de 1997 (muito intenso) foi usado na calibração das sub-bacias, assim como mais dois eventos de cheia, sendo um reservado para validação dos parâmetros. Na Figura 6, para uma sub-bacia, apresentam-se os parâmetros e dados de entrada, seguido de conjunto de gráficos para os eventos 1998, 1997 e 2002. Foram utilizados dados de evaporação provenientes de estações do tipo "Tanque classe A" disponíveis na bacia.

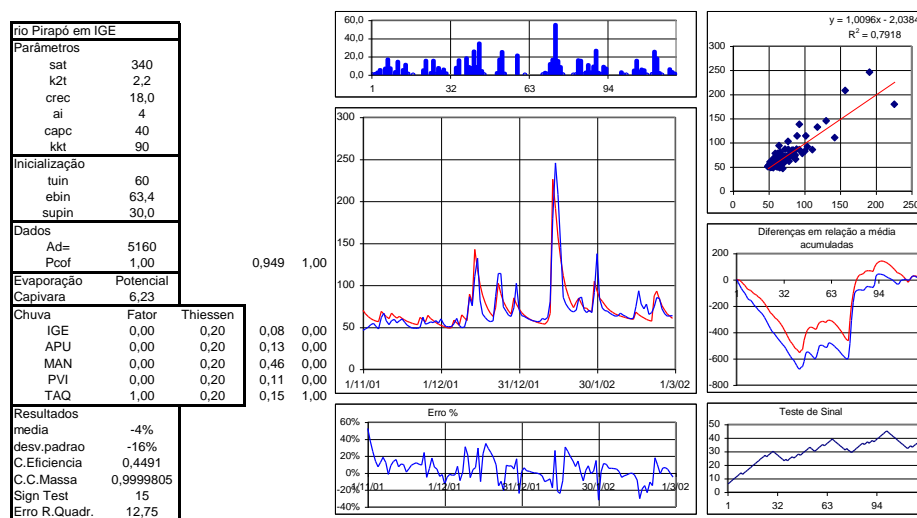


FIGURA 6. Gráficos e Resultados da Calibração

Para as sub-bacias sem posto de controle de vazão foram estimados os parâmetros por transposição das sub-bacias vizinhas com maior similaridade. Os postos de chuva e evaporação foram selecionados de acordo com a sua disponibilidade.

A interface com outros sistemas é feita através da base de dados temporais da DEIGP (BDP- Banco de Dados da Produção). Todos os dados são manipulados através do uso de um banco de dados relacional (MS-SQLServer) que permite carga automática da telemetria de chuva e níveis dos rios. Os resultados do modelo também ficam disponíveis nesse mesmo banco.



#### 4.0 - ROUTING

A denominação *Routing* é o processo de translação e amortecimento de uma onda de vazão se deslocando na calha de um rio. Existem várias técnicas para cálculo do routing, dentre as quais podem-se citar processos hidráulicos como os métodos hidrodinâmicos e os métodos simplificados como Muskingum. Nesse trabalho utiliza-se apenas a translação da onda de vazão considerando-se sua defasagem em horas.

Na Figura 7 ilustra-se o cálculo das vazões afluentes a Jurumirim, destacando-se um trecho do arquivo com três dias de dados horários. As primeiras quatro colunas apresentam as vazões das quatro sub-bacias à montante da usina. No primeiro bloco destacam-se os dados observados horários sobrepondo-se aos valores de vazão prevista média diária. Dessa forma os dados de vazão observada da telemetria são incorporados em tempo real.

O segundo grupo de quatro colunas referem-se aos mesmos dados com o cálculo de desagregação da vazão média diária em horária. A desagregação da série de vazão média diária é efetuada considerando a média móvel centrada de 24 horas, que preserva os volumes das séries.

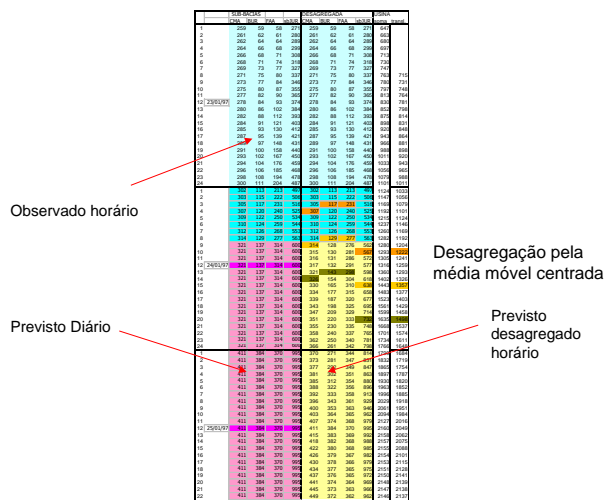


FIGURA 7. Cálculo das vazões

	SUB-BACIAS				DESAGREGADA				USINA		
	CMA	BUR	FAA	sbJUR	CMA	BUR	FAA	sbJUR	soma	transl.	
1		302	113	213	497	302	113	213	497	1124	1033
2		303	115	222	506	303	115	222	506	1147	1056
3		305	117	231	516	305	117	231	516	1169	1079
4		307	120	240	525	307	120	240	525	1192	1101
5		309	122	250	534	309	122	250	534	1215	1124
6		310	124	259	544	310	124	259	544	1237	1146
7		312	126	268	553	312	126	268	553	1260	1169
8		314	129	277	563	314	129	277	563	1282	1192
9		321	137	314	600	314	128	276	562	1280	1204
10		321	137	314	600	315	130	281	567	1293	1222
11		321	137	314	600	316	131	286	572	1305	1241
12	24/01/97	321	137	314	600	317	132	291	577	1316	1259
13		321	137	314	600	321	143	298	598	1360	1293
14		321	137	314	600	326	151	307	618	1402	1326
15		321	137	314	600	330	165	310	638	1443	1357
16		321	137	314	600	334	177	315	658	1483	1377
17		321	137	314	600	339	187	320	677	1523	1403
18		321	137	314	600	343	198	325	696	1561	1429
19		321	137	314	600	347	209	329	714	1599	1458
20		321	137	314	600	351	220	333	732	1636	1488
21		321	137	314	600	355	230	335	748	1668	1537
22		321	137	314	600	358	240	337	765	1701	1574
23		321	137	314	600	362	250	340	781	1734	1611
24		321	137	314	600	366	261	342	798	1766	1648

FIGURA 8. Cálculo do Routing

A composição da onda na usina pode ser visualizada na Figura 8. As duas últimas colunas indicam a soma das vazões das sub-bacias e a vazão composta pela translação das vazões, respectivamente. A defasagem das sub-bacias é: CMA=6 h, BUR= 7 h, FAA= 7 h, sbJUR=0 h.

A calibração do *Routing* foi efetuada com uma estimativa inicial que utiliza uma velocidade média da água de 1 m/s nos trechos de rio. Nos trechos de lago foi considerada uma celeridade da onda de 10 m/s.

Como o tempo de trânsito de ondas de cheias é variável com a vazão foram analisados conjuntos de medições de vazão dos postos fluviométricos, nos quais a velocidade da água é medida com molinetes. Foram utilizados dados de grandes e pequenos rios com vazão entre 20.000 m³/s no Rio Paraná e 400 m³/s em afluente do Rio Paranapanema. Esses dados permitiram refinar o ajuste inicial.

Para validação dos tempos de transito entre usinas foram levantados eventos recentes com variação brusca de vazões para análise dos hidrogramas, com o cálculo efetuado de forma gráfica.

#### 5.0 - SIMULADOR HIDRÁULICO

O simulador HydroSim CP é um módulo que se integra ao Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para o planejamento e a programação da operação de sistemas hidrotérmicos, denominado HydroLab® (Cicogna, 2003). O sistema HydroLab possui características importantes referentes ao gerenciamento de modelos e estudos, conforme os seguintes itens:

- Gerenciamento de usuários, perfis e segurança;
- Gerenciamento de vários modelos divididos em categorias: otimização, previsão e simulação;
- Interface com outros sistemas da DEIGP, como a base de dados dinâmicos (BDP) e as previsões de vazões fornecidas pelo modelo SMAP;

- Interface orientada a estudos: possibilidade de criar, salvar, editar e analisar estudos criados a partir dos modelos disponíveis.

Um exemplo do SSD HydroLab apresentando o módulo de simulação de curto prazo HydroSim CP pode ser visualizado na Figura 9.

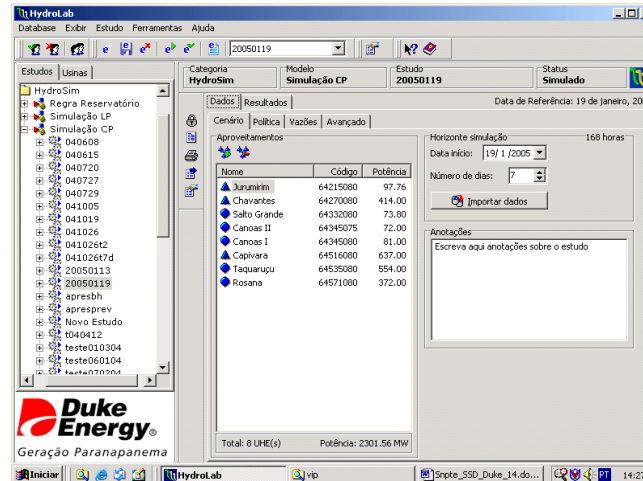


FIGURA 9. Sistema HydroLab e seu módulo HydroSim CP.

### 5.1 Características Principais do HydroSim CP

O modelo de simulação implementado para o módulo HydroSim CP tem as seguintes características principais:

- Simulação da operação de usinas hidrelétricas, reservatórios sem aproveitamento hidrelétrico e pontos de controle;
- Representação detalhada da operação hidráulica de usinas hidrelétricas: canal de fuga variável, rendimento variável (exemplo na curva colina Figura 10), engolimento máximo variável com a queda, rendimento dos geradores e efeito de afogamento do canal de fuga por outro reservatório ou confluência de um rio;
- Representação do efeito routing (translação e amortecimento de vazões) através do tempo de viagem entre aproveitamentos.

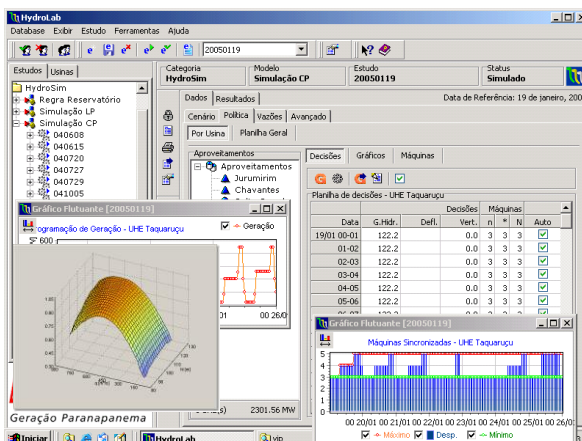


FIGURA 10. Entrada de dados de geração e vertimento.

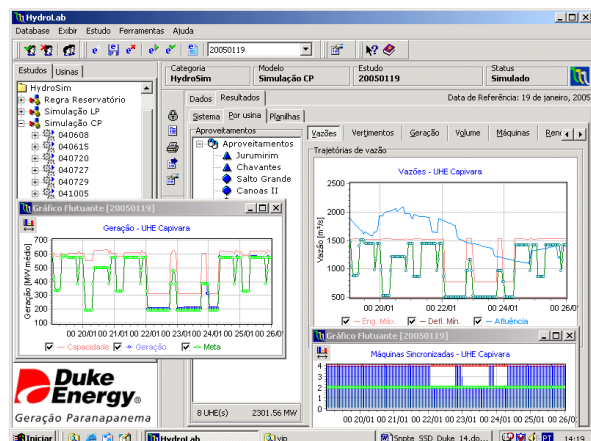


FIGURA 11. Recursos gráficos para análise dos resultados.

A entrada de dados para um estudo de simulação é simples e pode ser determinada pelos seguintes passos:

1. Escolha do conjunto de usinas hidrelétricas, reservatórios e pontos de controle a serem simulados.
2. Determinação da política operativa, ou seja, a forma com que as usinas e reservatórios devem operar. Pode-se especificar uma programação de geração ou defluências, conforme as necessidades do usuário.
3. Fornecer um cenário de vazões afluentes para o horizonte de simulação (para a DEIGP são os valores verificados ou a previsão de afluentes através do modelo SMAP).

4. Configurar os níveis iniciais dos reservatórios, volumes de espera e programação do despacho de máquinas.

Os dados estáticos das usinas, reservatórios e pontos de controle são gerenciados por uma base de dados própria do sistema HydroLab, denominada HydroData®. Existe, também, a opção de conectar o simulador à base de dados dinâmicos da empresa cliente, como é o caso implementado na DEIGP, tornando automático o preenchimento dos dados relacionados anteriormente.

Para o Passo 2, cabe salientar uma característica muito importante do simulador, que facilita muito seu uso pelos engenheiros da DEIGP. Pode-se fornecer a programação de geração e, se necessário, a evolução do vertimento para cada usina. O simulador determina a programação de vazões defluentes, segundo um criterioso cálculo hidráulico. Caso algum problema ocorra, como a violação de alguma restrição, o simulador corrige tais problemas, fornecendo ao usuário uma solução validada hidraulicamente. Além disso, é possível fornecer uma programação de vazões defluentes. O simulador determina a trajetória de geração hidrelétrica até o engolimento máximo da usina tornando mínimo o vertimento.

## 5.2 Análise dos Resultados

O HydroSim CP possui uma grande coleção de ferramentas gráficas para a análise da operação hidráulica dos reservatórios e vazões de em postos de controle. Pode-se destacar a apresentação das seguintes trajetórias, conforme ilustração da Figura 11:

- Armazenamento, limite máximo do reservatório e volume de espera;
- Vazões afluente, defluente, turbinada, limite máximo de engolimento e restrição de defluência mínima;
- Geração programada, simulada e seu limite máximo como função da disponibilidade, rendimento e engolimento máximo das máquinas;
- Número de máquinas em operação, disponibilidade como função da programação de manutenção das máquinas e restrição de número mínimo de máquinas sincronizadas;
- Rendimento dos conjuntos Turbina/Gerador e a produtividade da usina.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou experiência da *Duke Energy International*, Geração Paranapanema (DEIGP) na especificação e construção de um sistema Previsão/Simulação para suporte à decisão da Programação da Operação e Operação em Tempo Real do sistema gerador localizado no Rio Paranapanema.

A previsão de vazões afluentes às usinas é efetuada pelo modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure). Foram modeladas 22 sub-bacias numa área total de 100 mil km<sup>2</sup>. Estão disponíveis na telemetria da Empresa 32 estações pluviométricas e 12 estações fluviométricas. São utilizadas as previsões de chuva divulgadas pelo CPTEC/INPE.

O simulador hidráulico fornece informações sobre a evolução temporal dos níveis dos reservatórios e vazões defluentes, a partir do conhecimento da situação antecedente dos reservatórios, das vazões afluentes previstas, das gerações programadas, das características dos rios, usinas e reservatórios, bem como das restrições operativas hidráulicas. O simulador fornece suporte à decisão para a etapa de programação, através da análise do impacto hidráulico da programação de geração; para a operação em tempo real, permitindo a verificação de desvios entre os valores programados e verificados; e para a pós-operação como filtro contra erros de registro.

O sistema, em uso desde janeiro de 2004, agregou um grande valor à cadeia de suporte à decisão da área de operação da Duke Energy, permitindo que o planejamento, programação e operação de tempo real trabalhem de forma mais integrada e propiciando elevados ganhos de qualidade, precisão e tempo.

Outra constatação é a evolução técnica das equipes usuárias que devido a facilidade de uso do sistema podem dedicar mais tempo a análises das diversas soluções de operação possíveis (análises "What-If").

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CICO GNA M. A. *Um Sistema de Suporte à Decisão para a Operação de Sistemas de Energia Elétrica*. Tese de Doutorado. FEEC/UNICAMP, dezembro, 2003.
- (2) LOPES J.E.G., BRAGA B.P.F., CONEJO J.G.L. (1982), *SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology*, ed. V.P.Singh, Water Resources Publications.
- (3) LOPES J.E.G., PORTO R.L.L. (1991), *Técnica de Pesquisa Global de Parâmetros para a Calibração de Modelos Chuva-Vazão*, ABRH, IX Simpósio Bras. de Rec. Hídricos.