



MSUI

Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas

Versão 3.2

MANUAL DE METODOLOGIA

Outubro/2009

Eletrobrás 



ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Desenvolvimento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Representação do Sistema	2
1.3.1. Usinas Hidrelétricas	2
1.4. Operação do Sistema	3
1.4.1. Operação dos Reservatórios	3
2. METODOLOGIA	4
2.1. Introdução	4
2.2. Cálculo da Energia Firme	4
2.2.1. Cálculo do Período Crítico	4
2.2.2. Cálculo de Carga Crítica	6
2.3. Operação dos Reservatórios	8
2.3.1. Objetivo	8
2.3.2. Regras Operativas	8
2.4. Produção Energética	12
2.4.1. Cálculo das vazões associadas	12
2.4.2. Cálculo da Queda Líquida	15
2.4.3. Queda Líquida para Produção de Ponta - H	15
2.4.4. Queda Líquida para Produção de Energia - HD(i)	15
2.4.5. Produção acumulada de Energia - HYENSY(i)	16
2.4.6. Produção acumulada de Ponta - HYPKSY	17
2.5. Cálculo do Nível de Montante	17
2.5.1. Usinas com reservatório	17
2.5.2. Usinas sem reservatório	17
2.5.3. Cálculo do Nível de Jusante	18
2.6. Cálculo da Área do Reservatório	18
2.6.1. Usinas com reservatório	18
2.6.2. Usinas sem reservatório	19
2.7. Valor da Água	19
2.7.1. Valor da água considerando somente a queda própria	19
2.7.2. Valor da água considerando todas as usinas a jusante	19
2.8. Energia Armazenada	20
2.8.1. Cálculo do valor da água médio	20
2.9. Vazão Máxima para Ponta e Energia	22
2.9.1. Vazão máxima para produção de ponta	22
2.9.2. Vazão máxima devido as turbinas	22
2.10. Operação do Reservatório do AHE Jirau	23

1. INTRODUÇÃO

1.1. Desenvolvimento

Face à complexidade de cálculo de soluções ótimas para operação de sistema de geração de energia elétrica, os modelos de simulação tornam-se uma importante e imprescindível ferramenta para o planejamento da expansão e operação de tais sistemas. Estes modelos tentam representar com o máximo rigor as características das usinas hidráulicas, retratando o comportamento do sistema no caso de ocorrência de uma repetição das vazões naturais registradas no passado. O Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas (MSUI) é desse tipo, isto é, simula a operação detalhada do sistema hidrelétrico operando cada reservatório e cada usina segundo suas características particulares.

O objetivo da operação de um sistema constituído de usinas hidroelétricas termoelétricas é atender ao mercado ao menor custo possível, o que pode ser expresso por duas diretrizes:

- minimizar os gastos com combustível, uma vez que este é o componente básico do custo variável de operação;
- maximizar a eficiência das usinas hidroelétricas, evitando qualquer desperdício e distribuindo a reserva de água de forma a otimizar a produção de energia e a utilização dessa reserva.

A operação de um hipotético sistema isolado com apenas um reservatório é simples, pois o operador desse sistema não necessita de nenhuma regra complexa de operação: deve apenas atender ao requisito da carga. Assim, se a energia natural for menor que a carga, o reservatório se esvaziará, se for maior, o estoque aumentará até o volume máximo.

Existindo usinas a fio d'água, o operador tentará turbinar toda água nelas disponível, limitado à capacidade das máquinas ou à carga, mantendo o excesso ou complementando o requisito com a usina de reservatório.

Quando, porém, existe um sistema de reservatórios e de usinas em cascata e em paralelo, a situação muda por completo, pois existem infinitas maneiras de armazenar ou de desestocar a água dos reservatórios, cada uma com resultados um pouco diferentes.

1.2. Objetivos

O modelo foi projetado para simular a operação de um sistema constituído de usinas hidráulicas sob diversas condições de carga e hidraulicidade, subordinadas a um conjunto de parâmetros definidores de prioridades. Seus principais objetivos englobam:

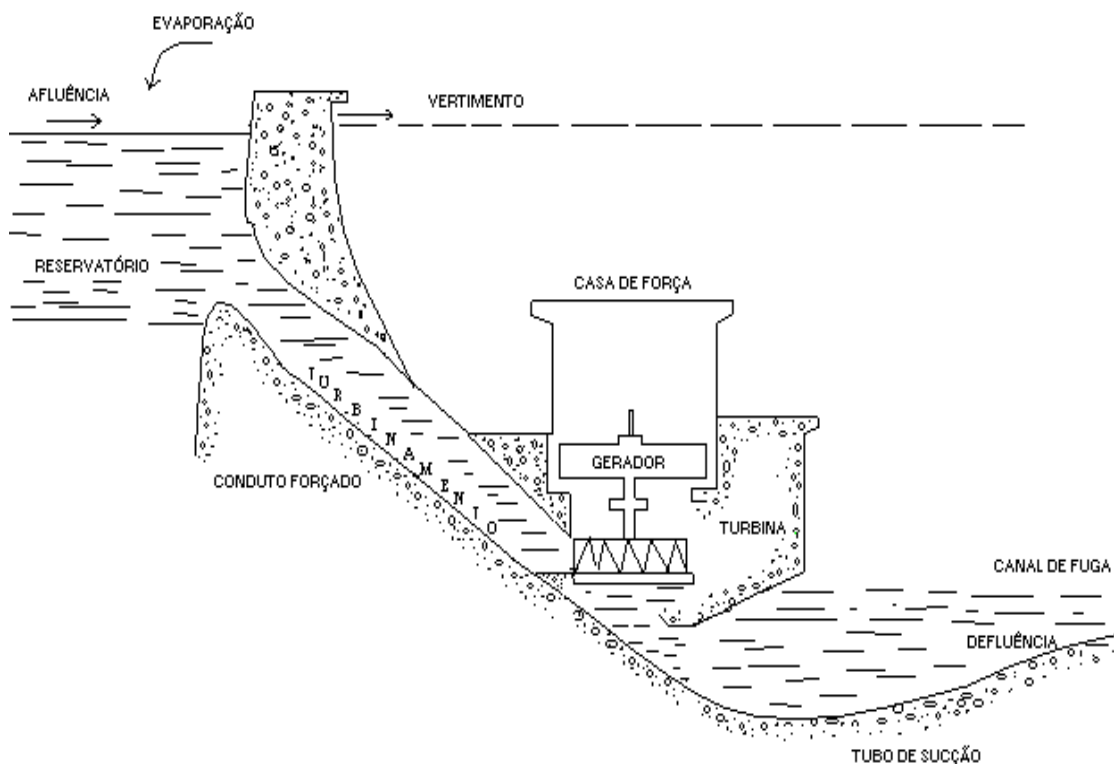
- convergência da carga máxima garantida de uma determinada configuração de usinas e cálculo do respectivo período crítico;
- avaliação do comportamento de um sistema em expansão face a projeções de mercado e séries hidrológicas dadas;

- avaliação do balanço de ponta e posições relativas das usinas térmicas e reversíveis;
- avaliação do comportamento de uma usina individualizada através de seus parâmetros característicos;

1.3. Representação do Sistema

1.3.1. Usinas Hidrelétricas

PERFIL DE UMA USINA HIDRELÉTRICA



São representadas pelos seguintes dados de entrada:

- curva de cota do reservatório em função do volume;
- curva de área do reservatório em função da cota;
- curva do nível de jusante em função da vazão defluente;
- volumes mínimo, máximo e de vertimento;
- nível médio do canal de fuga;
- potência instalada;
- número de unidades;
- perdas hidráulicas médias nas tubulações;
- queda de referência;
- rendimento médio do conjunto turbina e gerador;
- dados das turbinas e geradores;
- evaporação;
- série de vazões naturais afluentes;
- vazões de desvio;
- vazão mínima.

1.4. Operação do Sistema

A operação do sistema é simulada mês a mês tendo como objetivo atender aos requisitos mensais e condicionada pelas vazões naturais dos postos correspondentes às usinas hidráulicas.

O programa tenta atender a carga mensal minimizando o vertimento, e procurando manter o volume dos reservatórios entre as curvas de controle superiores e inferiores. Tenta ainda redistribuir a reserva hidráulica disponível de modo a recuperar o nível dos reservatórios de alta prioridade de enchimento, valorizando deste modo as afluições futuras e aumentando a expectativa de geração hidráulica.

1.4.1. Operação dos Reservatórios

A operação dos reservatórios é controlada pelas seguintes variáveis:

- prioridade de enchimento e esvaziamento;
- curvas de controle superiores e inferiores dos reservatórios (ou através de faixas paralelas).

O esvaziamento é feito pela ordem de prioridade até as curvas de controle superiores e depois, até as inferiores (ou faixa a faixa).

O enchimento é feito pela ordem de prioridade de enchimento até as curvas de controle inferiores e depois até as superiores (ou faixa a faixa).

- vazões mínimas defluentes;
- capacidades máximas de turbinamento das usinas.

2. METODOLOGIA

2.1. Introdução

O objetivo da simulação consiste em percorrer todas as séries e anos de simulação operando as usinas ao menor custo, ou seja, tentando fazer com que a energia produzida das usinas seja igual ao mercado especificado (maximizando sua energia e minimizando os vertimentos).

Observa-se que o programa tenta atingir a carga mensal iterativamente e termina cada vez que ocorre uma das seguintes condições:

- a diferença entre a produção energética total e a carga for menor que o critério de convergência;
- existe déficit na produção, mas não há possibilidade de esvaziar os reservatórios.
- existe excesso na produção, mas não há possibilidade de encher os reservatórios.
- o número de iterações atingiu o máximo (30).

2.2. Cálculo da Energia Firme

Entende-se como crítico o período em que os reservatórios do sistema partindo cheios e sem reenchimentos totais intermediários sejam deplecionados ao máximo. A energia gerada dentro do período crítico é chamada de energia firme ou carga crítica do sistema.

2.2.1. Cálculo do Período Crítico

Suponhamos ser dado um período inicial através do qual deva ser pesquisado o período crítico. Em situações extremas, de total desconhecimento do sistema hidrotermelétrico, pode ser considerado o período total de simulação.

No período de pesquisa, deve-se observar os meses em que os reservatórios atinjam enchimentos suficientes para transformá-los em possíveis candidatos ao início do período crítico. Serão considerados candidatos os meses tais que suas energias armazenadas sejam iguais ou maiores que as anteriores, ou que, por impossibilidade de um máximo enchimento dos reservatórios, a menos de uma dada tolerância e > 0 , forem iguais ao seu máximo valor.

Especificamente, é construída uma seqüência $\{M_0, M_1, M_2, \dots\}$ de datas candidatas ao início do período crítico tais que:

$$EAM_{i-1} \leq EAM_i \quad (I.1) \quad \text{ou} \quad EAM_i > (1-e)EAMAX, i \geq 1 \quad (I.2)$$

Onde:

$EAMAX$Energia Armazenada Máxima

EAM_i Energia Armazenada no mês M_i

EAM_0Energia Armazenada no primeiro Mês do período de pesquisa.

e.....Tolerância da Energia Armazenada Máxima para o cálculo do mês inicial de período crítico (p.u.)

Assim, por (I.2) foi definida uma faixa aberta de tolerância para o valor da energia armazenada máxima.

Paralelamente, serão determinados os meses tais que, para garantir o atendimento da carga crítica do sistema, os reservatórios serão deplecionados ao máximo possível.

A partir daí, será analisado o comportamento do sistema, levando em conta os seguintes aspectos:

– **Em apenas uma vez ocorre um máximo deplecionamento**

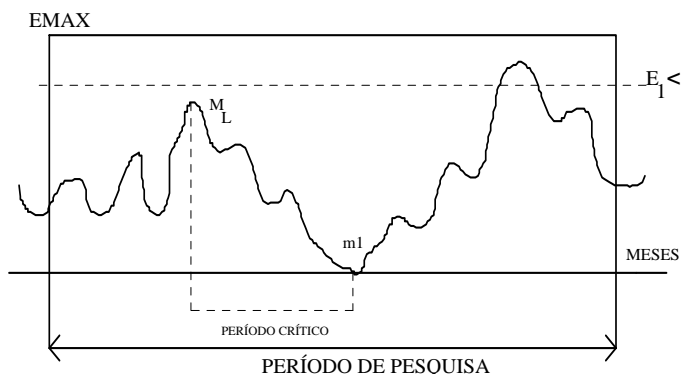
Seja $M_L = \{M_i, i \geq 0\}$ a data do primeiro candidato ao máximo, anterior data correspondente ao valor da energia armazenada mínima.

Neste caso tem-se duas situações a considerar:

a) $EAM_L < (1 - e) EAMAX$, ou seja, a data do primeiro máximo anterior ao mínimo está fora da faixa de tolerância.

Nesta situação, por construção da seqüência $\{M_i, i > 0\}$ está garantida a não existência de um outro máximo dentro da faixa considerada. Daí, fica automaticamente determinado o período crítico.

A ilustração gráfica ao lado, elucida o exposto.



b) $EAM_L \geq (1 - e) EAMAX$, ou seja, o primeiro máximo em data anterior ao mínimo está dentro da faixa de tolerância.

Nesta situação, é perfeitamente viável a existência de meses com energia armazenada maior do que o valor de EAM_L .

O que se propõe pesquisar é, no mesmo ano e em meses anteriores, o maior valor da energia armazenada, caracterizando definitivamente o início de período crítico.

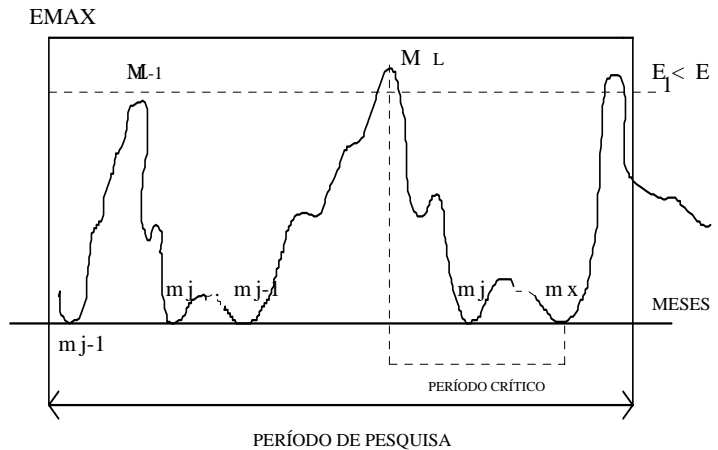
– **Para a mesma seqüência de aflúncias naturais históricas ocorre mais de um máximo deplecionamento**

Seja $M_L = \{M_i, i \geq 0\}$ a data do primeiro candidato ao máximo, anterior à última data correspondente ao valor da energia armazenada mínima.

Aqui, tem-se as seguintes situações a considerar:

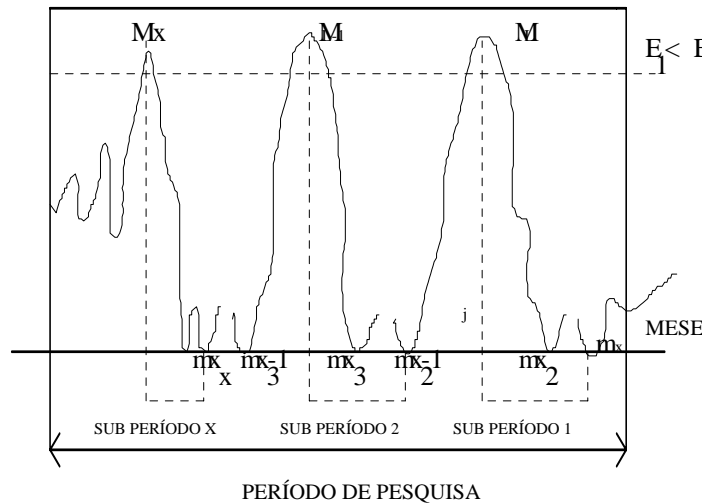
- a) M_L está dentro da faixa de tolerância, entre dois mínimos, e o máximo M_{L-1} , entre mínimos, está fora da faixa.

Aqui, uma vez que $EAM_{L-1} \leq (1 - e) E_{MAX}$ e por (1), ficam descartados todos os máximos anteriores a M_L como início do período crítico.



- b) Os máximos $X-1, X, X+1, \dots, L$ estão dentro da faixa de tolerância e entre mínimos.

Essa é a situação em que deve-se considerar os sub-períodos ou períodos secos criados dentro do período de pesquisa, tais que, sem reenchimentos totais intermediários, os reservatórios partem, a menos de "e", cheios e serão deplecionados ao máximo possível, para garantir a carga crítica do sistema.



2.2.2. Cálculo de Carga Crítica

2.2.2.1. Cálculo do Mercado Inicial de Energia

Sejam:

- POT_iPotência instalada da i^{ma} unidade geradora
- $NUTLH_i$Empresa proprietária da i^{ma} unidade geradora
- ME_0Mercado inicial de Energia
- MP_0Mercado inicial de Ponta

Daí $PINST_j$ sendo a potência instalada correspondente J^{ma} empresa, vem:

$$PINST_j = \sum_{i \in G} POT_i$$

onde, G é o conjunto de todas as unidades geradoras da empresa j.

Dado que PT, a potência instalada total do sistema, será:

$$PT = \sum_{J \in E} PINST_J$$

onde, E é o conjunto de todas as empresas

Para um fator de capacidade FCAP, tem-se:

$$ME_0 = FCAP \times PT$$

E um fator de carga para o mercado FCM:

$$MP_0 = \frac{ME_0}{FCM}$$

2.2.2.2. Critério de Convergência

Procura-se obter uma carga que maximize o deplecionamento dos reservatórios no mês correspondente ao final do período crítico, sem entretanto permitir a ocorrência de déficits. Salienta-se porém que, por restrições operativas alguns reservatórios podem apresentar um armazenamento residual, impossibilitando-os de serem usados para a geração. Por esse motivo, introduz-se uma fração **p**, sobre a energia armazenada máxima que regule tal resíduo.

Seja:

EAMAX.....	Energia Armazenada Máxima do sistema
EAIPC.....	Energia armazenada correspondente ao primeiro mês do período crítico
EAFPC.....	Energia armazenada correspondente ao último mês do período crítico
NMESES	Número de meses de duração do período crítico
SDEFPC.....	Soma dos déficits durante o período crítico
PEAF.....	Fator de armazenamento final de período crítico
TOLCAR	Tolerância de convergência para o mercado de energia
ME	Mercado de Energia
MP	Mercado de Ponta

2.2.2.3. Algoritmo de Convergência

<i>ITERAÇÃO</i>	$\leftarrow 0$
<i>ME</i>	$\leftarrow ME_0$
<i>RESÍDUO CRÍTICO</i>	$\leftarrow +\infty$

Enquanto $\left| RESÍDUO CRÍTICO \right| > TOLCAR \times ME$

- $ITERAÇÃO \leftarrow ITERAÇÃO + 1$
- SIMULAÇÃO DO MSUI

$$\bullet \text{ RESÍDUO CRÍTICO} = \frac{EAFPC - SDEFPC - PEA \times EAMAX - (EAMAX - EAIPC)}{NMESES}$$

$$ME \leftarrow ME + \text{RESÍDUO CRÍTICO}$$

$$\bullet \text{ MP} \leftarrow \frac{ME}{FCMER}$$

Fim enquanto

2.3. Operação dos Reservatórios

2.3.1. Objetivo

Esvaziamento ou enchimento dos reservatórios, baseado nas curvas de controle inferiores e superiores ou faixas paralelas.

A operação consiste em definir os limites de esvaziamento (enchimento) de acordo com a função de prioridades, baseado no aumento de geração provocado nas usinas de jusante, respeitando suas curvas empíricas de operação.

2.3.2. Regras Operativas

Considere a função prioridade de esvaziamento definida por:

$$\text{NPRESV: } \{1, \dots, \text{NRES}\} \Rightarrow \{1, \dots, \text{NHV}\}$$

onde a cada prioridade de esvaziamento $\text{NR} \in \{1, \dots, \text{NRES}\}$, $\text{NPRESV}(\text{NR})$ será o número da usina com reservatório correspondente.

Por simplicidade, considere $I = \text{NPRESV}(1)$

Definamos a função

$$\text{MPRES: } \{1, \dots, \text{NHV}\} \Rightarrow \{0, 1, 2, \dots, \text{NRES}\}$$

onde:

$$\text{MPRES}(x) = \begin{cases} Y, & \text{se a usina } x \text{ tem reservatório e } y \text{ será sua ordem} \\ 0, & \text{se a usina } x \text{ não tiver reservatório} \end{cases}$$

e seja $\text{IP} = \text{MPRES}(I)$; onde I , a usina correspondente a $\text{NPRES}(1)$

– Determinação do limite de esvaziamento

Defina-se o limite de esvaziamento, RCK , como o ponto médio entre o volume máximo e a curva de controle superior. Especificamente, tem-se:

$$RCK = RU(IP, M) + \frac{VMAX(I) - RU(IP, M)}{2},$$

onde:

RU(IP,M)..... curva de controle superior do reservatório IP ao mês M;

VMAX(I)..... volume máximo da usina em questão.

No caso da operação através das faixas paralelas o limite de esvaziamento será:

$$RCK = \frac{VE(I) - VMIN(I)}{N}, \text{ onde } N \text{ é o número de faixas.}$$

Defina-se o esvaziamento:

$$STORCH = \frac{VE(I) - RCK}{CONV(M)}, \text{ onde } VE(I) \text{ é o volume de início de mês da usina e}$$

CONV(M) um fator de conversão dado pelo número de segundos do mês M em questão.

– Determinação da maior folga no engolimento - STR

A variável KVERT (Dgeraism.dat) permite (=0) ou proíbe (=1) o vertimento nas usinas. Caso permitido, será liberado o vertimento nas usinas cujo esvaziamento provocará aumento de geração nas usinas de jusante (faz NDG(I) = 1).

Caso tenha sido liberado vertimento na usina em questão (NDG(I) = 1), determine a maior folga no engolimento, especificando:

Se NDG(I) = 1 $STR = \text{Max} \{FCMAX(J) \times QMAX(J) - QREG(J), J=I \text{ e suas jusantes}\}$ onde FCMAX(J) é o fator de carga máximo para produção contínua de energia, definido como $(1-TEIF)*(1-IP)$, QMAX(J) a vazão máxima para ponta e QREG(J) sua vazão defluente.

A partir daí, redefina-se o esvaziamento:

$$STORCH = \text{Min} \left\{ \frac{VE(I) - RCK}{CONV(M)}, STR \right\}$$

Caso não tenha sido liberado o vertimento na usina em questão (NDG(I) = 0) calculamos o esvaziamento do reservatório até um limite tal que não haja vertimento na própria usina e nas de jusante onde não tiver sido liberado o vertimento. ou seja:

$$\text{Se } NDG = 0 \Rightarrow STORCH = \text{Min} \left\{ \frac{VE(I) - RCK}{CONV(M)}, QMAX(J) FCMAX(J) - QREG(J) \mid J = I \text{ e suas jusantes} \right.$$

tais que NDG(J) = 0

Testa-se critério de convergência, considerando o próximo reservatório pela ordem de prioridades se o esvaziamento for menor do que tolerância dada (0.01).

– Redefinição do esvaziamento em função do volume de vertimento

Caso o volume de fim de mês da usina não permita vertimento, ou seja:

Se $VSPILL(I) + STORCH \times CONV(M) > VE(I)$, onde $VSPILL(I)$ é o volume de vertimento da usina I.

e em contrapartida:

$$STORCH > FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I),$$

diminua-se o esvaziamento, redefinindo-o

$$STORCH = FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I)$$

Se a partir dessa diminuição, tivermos:

$$VSPILL(I) + STORCH \times CONV(M) < VE(I) \text{ ou seja:}$$

$$VSPILL(I) + [FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I)]CONV(M) < VE(I), \text{ ou}$$

$$FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I) < \frac{VE(I) - VSPILL(I)}{CONV(M)}$$

aumenta-se o esvaziamento para:

$$STORCH = FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I) + \{VE(I) - [FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I)]CONV(M) - VSPILL(I)\} \div$$

$$CONV(M) = \frac{VE(I) - VSPILL(I)}{CONV(M)}$$

Ou seja:

$$STORCH = \frac{VE(I) - VSPILL(I)}{CONV(M)}, \text{ se } \frac{VE(I) - VSPILL(I)}{CONV(M)} > FCMAX(I) \times QMAX(I) - QREG(I)$$

Neste ponto testa-se critério de convergência, considerando o próximo reservatório na ordem dada pela função de prioridades se o esvaziamento for menor do que a tolerância (0.01).

– Cálculo da Energia produzida com o aumento da vazão defluente

Calcula-se o valor da energia produzida através do aumento de vazão defluente (STMW).

$STMW = STORCH \times STVAL(I)$, onde $STVAL(I)$, o valor da água da usina I considerando a queda própria e todas as quedas das usinas de jusante.

Se o valor da energia for maior do que o déficit residual, anula-se o déficit, diminuindo o esvaziamento.

ou seja:

Se $STMW < DEFICIT$ $DEFICIT \leftarrow DEFICIT - STMW$

e

$$STMW = DEFICIT$$

$$STMW > DEFICIT \quad \text{STORCH} = \frac{STMW}{STVAL}$$

e

$$DEFICIT = 0$$

– **Cálculo da nova vazão defluente e volume atualizado, em função do novo esvaziamento**

Atualiza-se o volume de final de mês $\overline{VE}(i)$ e a vazão regularizada da usina:

$$VE(I) = VE(I) - \frac{STMW \times CONV(M)}{STVAL(I)}$$

$QREG(J) = QREG(J) + \text{STORCH}$, para todo $j = I$ e jusante de I

Para J , jusante de I tais que $QREG(J) > FC\text{MAX}(J) \times Q\text{MAX}(J)$ e $VE(J) < V\text{SPILL}(J)$, aumenta-se seu volume de fim de mês para:

$$VE(J) = VE(J) + [QREG(I) - FC\text{MAX}(J) \times Q\text{MAX}(J)] \text{CONV}(M)$$

caso contrário passa-se à próxima jusante.

– **Redefinição do esvaziamento**

Se a partir daí, ainda persistir $VE(J) < V\text{SPILL}(J)$, diminui-se: o esvaziamento de uma parcela $QREG(J) - FC\text{MAX}(J) \times Q\text{MAX}(J)$, e a vazão defluente dessa jusante para $FC\text{MAX}(J) \times Q\text{MAX}(J)$ e passa-se à próxima jusante, repetindo a operação.

Caso contrário, se $VE(J) > V\text{SPILL}(J)$, diminui-se o esvaziamento para $QREG(J) - FC\text{MAX}(J) \times Q\text{MAX}(J)[VE(J) - V\text{SPILL}] \div \text{CONV}(M)$ e o volume de fim de mês para $V\text{SPILL}(J)$ e encontra-se a próxima jusante, repetindo a operação.

– **Conclusões**

Após percorrer-se todas as jusantes, se o déficit j for nulo ou negativo, o objetivo foi alcançado.

Se ainda houver déficit, deve-se encontrar o próximo reservatório pela função prioridade de esvaziamento e repetir toda a operação até finalizar-se todos os reservatórios.

Se ao final de todos os reservatórios ainda houver déficit define-se um outro limite de esvaziamento.

$$RCK = RU(IP, M)$$

Analogamente, defina-se: $RCK = RL(IP,M)$

A partir daí, caso não tenha sido permitido liberar vertimento em nenhuma usina ($KVERT=1$), inicializa-se esvaziamento 20 passos abaixo das curvas de controle inferior.

$$RCK = RL(IP,M) - REDUCE (RL(IP,M) - VMIN(I)) COEFDD(IP)$$

$$0 \leq REDUCE \leq 20$$

onde $COEFDD(IP)$ é o coeficiente que controla o esvaziamento dos reservatórios abaixo da curva de controle inferior.

Caso tenha sido permitido liberar vertimento em alguma usina ($KVERT = 0$), libere naquelas cujo esvaziamento provocar aumento de geração nas de jusante ($STVAL > 0$) e para as que foi permitido vertimento ($NDG(I) = 1$) e reinicializa-se toda a operação definindo o limite de esvaziamento como ponto médio entre o volume máximo e a curva de controle superior e assim sucessivamente, até o máximo 20 passos abaixo da curva de controle inferior.

2.4. Produção Energética

2.4.1. Cálculo das vazões associadas

São calculadas as vazões:

– vazão evaporada

$$QVP(i) = \frac{10^{-3} \cdot EVAP(K, M) \cdot \text{ÁREA}}{CONV(M)}$$
 onde ÁREA é a área correspondente ao espelho d'água, em km^2 .

– correspondente à variação de volume

$$QSTOR(i) = \frac{VE(i) - VB(i)}{CONV(M)}$$

– defluente

$$QREG(i) = QINFL(i) - QVP(i) - QSTOR(i)$$

– Cálculo da vazão defluente para as usinas com enchimento de volume morto

Dependendo do indicador de enchimento de volume morto ($IVMORT(i)$) as seguintes decisões são tomadas:

IVMORT(i) = 1:

$$QREG(i) = \min \{ VAZVOL_1(x), QMAQUI(i) \}$$

IVMORT(i) = 2:

$$QREG(i) = \min \{ VAZVOL_1(x), QMAQUI(i), QINFL(i) \}$$

IVMORT(i) = 3:

$$QREG(i) = 0.$$

– Alteração nos volumes de fim de mês, caso esteja abaixo do mínimo

Se o volume da usina estiver abaixo do mínimo ($VE(i) < VMIN(i)$), diminua a vazão de uma parcela correspondente a $VMIN(i) - VE(i)$ e aumente o volume até o mínimo. Porém se com a diminuição de vazão, a mesma ficar negativa, zere-a diminuindo o volume de uma parcela correspondente a $QREG(i) \times CONV(M)$.

– Processo Iterativo I

Finalidade: Atendimento á vazão mínima, limitando o volume ao seu valor mínimo.

Se a vazão defluente estiver abaixo da mínima, diminua o volume da usina de uma parcela ($QMIN(i) - QREG(i)$) $CONV(M)$ e aumente a vazão defluente até a mínima. Se com esta diminuição de volume, o mesmo encontrar-se abaixo do mínimo, aumente-o diminuindo a vazão de uma parcela ($VMIN(i) - VE(i)$) $\div CONV(M)$. Porém se a nova vazão for negativa, zere-a diminuindo o volume de $QREG(i) CONV(M)$.

O processo, num máximo de uma iteração, consiste em recomeçar a rotina recalculando as vazões associadas $QREG(i) \geq QMIN(i)$.

– Cálculo do indicador de vazão mínima - MFL(i)

Se $QREG(i) = 0 \Rightarrow MFL(i) = 0$

Se $QREG > 0$

$$MFL(I) = \begin{cases} 0 & \text{se } \frac{QREG(I) - QMIN(I)}{QREG(I)} > 10^2 \\ 1, C.C & \end{cases}$$

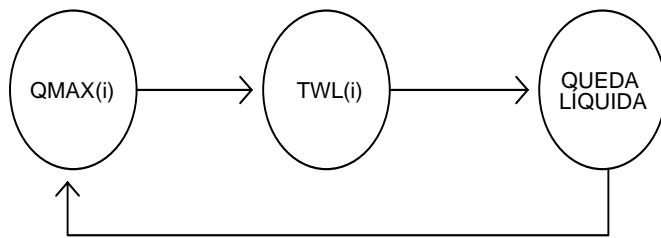
Calcule-se o nível de jusante correspondente á vazão defluente (TWX) através do polinômio vazão nível de jusante.

– Processo Iterativo II

Finalidade:Cálculo do nível médio de jusante - $TWL(i)$ - e vazão Máxima - $QMAX(i)$ - para Produção de Ponta.

Estes dois valores São calculados iterativamente recalculando a queda líquida a cada mudança do nível de jusante.

Esquemáticamente, o Processo consiste em:



O processo, num máximo de 5 iterações, finaliza-se quando:

$$\frac{QMAX(i) - QTW(i)}{QTW(i)} < 0.02$$

Onde QTW é o valor atualizado de QMAX(i).

– Processo Iterativo III

Finalidade: Eliminar o vertimento até atingir o Volume Máximo, caso haja vertimento de energia armazenável - $FCMAX(i) \times QMAX(i)$

Aumenta-se o volume da usina de uma parcela dada por $0.9(QREG(i) - FCMAX(i) \times QMAX(i))$ e recomeça-se o cálculo das vazões associadas.

O Processo, num máximo de 3 iterações, finaliza-se quando ou o volume da usina atingir o máximo, ou tiver sido liberado o vertimento na usina ou a vazão defluente estiver abaixo da mínima, ou seja:

$$VE(i) \geq VMAX(i) \text{ ou}$$

$$NDG(i) = 1 \text{ ou}$$

$$MFL(i) = 1$$

O que significa que para garantir uma vazão mínima, um vertimento na usina pode ser justificado.

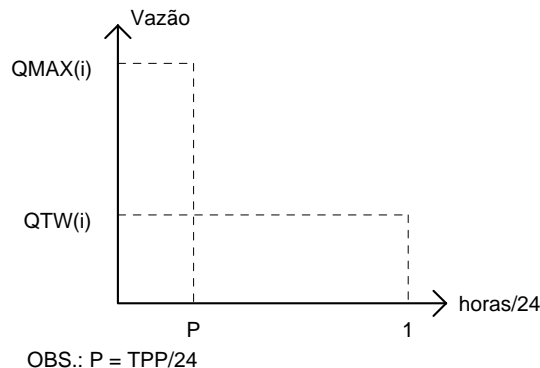
– Processo Iterativo IV

Finalidade: Minimizar a vazão vertida, aumentando o volume da usina em uma parcela dada por $QSP(i) \times CONV(M)$, limitado pelo volume de vertimento.

O Processo consiste em recomeçar a rotina recalculando as vazões associadas, num máximo de uma iteração. Não é realizada se o volume da usina for maior ou igual que o de vertimento.

2.4.2. Cálculo da Queda Líquida

O cálculo da queda líquida leva em consideração o nível de jusante dentro e fora da Ponta, correspondendo aos dois patamares do diagrama de carga diário abaixo:



2.4.3. Queda Líquida para Produção de Ponta - H

Calcula-se (rotina TAILWT) através do polimônio PVN (vazão X Nível de jusante), o nível de jusante - TWL_P - correspondente à soma da vazão vertida com a vazão na hora da ponta - $Q_{TW}(i)$ - ; ou seja, calcula-se :

$$Q_{TW}(i) = Q_{MAX}(i) + Q_{SP}(i)$$

Sendo $PVN_i(x)$ o polinômio vazão X Nível de jusante da i ésima usina, tem-se :

$$TWL_P(i) = PVN_i(Q_{TW}(i))$$

Finalmente :

$$H = FB(i) - TWL_P - HLOSS(i)$$

2.4.4. Queda Líquida para Produção de Energia - HD(i)

Para o cálculo da queda líquida para Produção de energia é levado em consideração o nível médio de jusante durante a PONTA.

É definida uma variável - $\acute{A}GUA$ - que indique a existência ou não de água para garantir a PONTA, fornecendo a vazão média turbinada nessa hora. Especificamente:

$$FAGUA = \begin{cases} \frac{Q_{PLT}(I)}{P}, & \text{se } \frac{Q_{PLT}(I)}{P} < Q_{MAX} \\ Q_{MAX}(I), & C.C \end{cases}$$

Existem assim, dois casos a serem considerados:

– **A Ponta não foi garantida : FÁGUA < QMAX**

Calcula-se (rotina TAILWT) através do polinômio PVN, o nível de jusante - TWX - correspondente QTW, onde :

$$QTW = FÁGUA + QSP(i) \quad e \quad TWX = PVN_i(QTW(i))$$

Finalmente:

$$TWL(I) = TWX + \frac{QMAX(I) \times P \times (TWL_P(I) - TWX)}{QPLT(I)}$$

$$HD(i) = FB(i) - TWL(i) - HLOSS(i)$$

– **A Ponta foi garantida : FÁGUA = QMAX**

Se neste caso, a usina encontrar-se no seu fator de carga máximo - TQM(i) = 0 - significando existência de vertimento, pois QREG(i) ≥ FCMAX(i)×QMAX(i), a queda líquida para a produção de energia ser igual a da PONTA:

$$HD(i) = H$$

Caso contrário, se a usina não encontrar-se em seu fator de carga máximo, calcula-se (rotina TAILWT) através do polinômio PVN, o nível de jusante TWX - correspondente à QTW, onde:

$$QTW = \frac{QPLT(I) - p \times QMAX(I)}{1 - p} + QSP(I)$$

$$TWX = PVN_i(QTW(I))$$

Finalmente:

$$TWL(I) = TWX + \frac{QMAX(I) \times P \times (TWL_P(I) - TWX)}{QPLT(I)}$$

$$HD(i) = FB(i) - TWL(i) - HLOSS(i)$$

2.4.5. Produção acumulada de Energia - HYENSY(i)

$$HYENSY = \sum_{I \in U} HYGEN(I)$$

$$HYGEN(i) = 0.00981 QMAX(i) \times HD(i) \times EFFCY(i)$$

onde:

EFFCY(i) é o rendimento do conjunto turbina-gerador (por unidade)

U é o conjunto de usinas.

2.4.6. Produção acumulada de Ponta - HYPKSY

$$\text{HYPKSY} = \sum_{i \in U} \text{HYPK}(I)$$

$$\text{HYPK} = 9.81 \times 10^{-3} \text{ QMAX}(i) \times H(i) \times \text{EFFCY}(i)$$

– Cálculo do total de perdas de energia em transmissão - TREN

$$\text{TREN} = \sum_{i \in U} \text{HYGEN}(I) \text{ENL} \times \text{OSS}(I) \times \text{NEHY}(I)$$

Onde:

ENLOSSé o valor das perdas de energia na transmissão (por unidade)

NEHYé o indicador de perdas na transmissão.

– Cálculo do total das perdas de Ponta na transmissão - TRPK

$$\text{TRPK} = \sum_{i \in U} \text{HYPK}(I) \times \text{PKLOSS} \times \text{NEHY}$$

Onde:

PKLOSSé o valor das perdas de Ponta na transmissão em p.u.

2.5. Cálculo do Nível de Montante

Cálculo do nível de montante em função do volume:

2.5.1. Usinas com reservatório

$$\text{FBAY} = \text{PVC}_0 + \text{VAVGE} (\text{PC}_1 + \text{VAVGE} (\text{PC}_2 + \text{VAVGE} (\text{PC}_3 + \text{VAVGE} (\text{PC}_4)))$$

Onde :

FBAY.....é o nível de montante (m)

VAVGEé o volume atual do reservatório (10^6 m^3)

PVC_i é coeficiente de grau (i) do polinômio Volume x Cota.

2.5.2. Usinas sem reservatório

$$\text{FBAY} = \text{CTMED}$$

Onde CTMED é o nível de montante médio especificado (m)

2.5.3. Cálculo do Nível de Jusante

O Cálculo do nível de jusante, em função da vazão defluente (TWX_1):

– Cálculo de TWX

$$QTWX = QTW + QDESVCF(I) + QINTCF(I)$$

$$TWX_1 = PVN_0 + QTWX (PVN_1 + QTWX (PVN_2 + QTWX (PVN_3 + QTWX (PVN_4)))$$

$$TWX = \text{máx} \{ TWX_1, FBDS \}$$

Onde:

TWX é o nível de jusante (m)

$FBDS$ é o nível de montante da usina de jusante (m)

PVN_i é coeficiente do grau (i) do polinômio vazão x Nível de Jusante

QTW é a vazão defluente (m^3/s)

$QTWX$ é a vazão defluente total (m^3/s)

$QDESVCF(I)$ é o módulo da vazão de desvio, quando o flag $IDSVCF(I)$ está ligado (igual a 1) ou seja, quando o desvio d'água influencia o nível do canal de fuga da usina, e a vazão de desvio é negativa (retirada d'água). Caso contrário, seu valor é zero (m^3/s)

$QINTCF(I)$ é a vazão do posto de vazões intermediárias que influenciam o nível do canal de fuga da usina, quando o posto $IPSTQINT(I)$ é diferente de zero (m^3/s). Caso contrário, seu valor é zero (m^3/s).

OBS: quando o desvio influencia o nível do canal de fuga, ele retorna ao leito do rio e, portanto, será acrescido à vazão incremental da usina de jusante. Com relação à vazão do posto intermediário, pelo pressuposto de se tratar de uma vazão natural, isso não ocorrerá, pois a vazão incremental da usina de jusante já terá levado isso em conta.

2.6. Cálculo da Área do Reservatório

O Cálculo da área do reservatório, em função do nível de montante:

2.6.1. Usinas com reservatório

$$\acute{A}REAX = PVA_0 + FB (PCA_1 + FB (PCA_2 + FB (PCA_3 + FB (PCA_4)))$$

Onde :

AREAXé a área resultante (km²)
 FBé o nível de montante (m)
 PCA_ié coeficiente do grau (i) do polinômio Cota x Área.

2.6.2. Usinas sem reservatório

ÁREAX = ARMED

Onde, ARMED é a área média especificada (km²)

2.7. Valor da Água

São calculados os valores da água usados nos procedimentos de esvaziamento e enchimento para estimar o aumento ou diminuição da energia produzida na usina devido a variação na vazão turbinada.

2.7.1. Valor da água considerando somente a queda própria

$PFACT_i = HYGEN_i \div QPLT_i$ se $QPLT_i \neq 0$

$PFACT_i = 0$ se $QPLT_i = 0$

onde:

$PFACT_i$ = valor da água (MW-mês/m³/s)

$HYGEN_i$ = energia total produzida (MW-mês)

$QPLT_i$ = vazão turbinada (m³/s)

2.7.2. Valor da água considerando todas as usinas a jusante

$$STVAL_i = \sum_{K \in U_i} PFACT_K$$

$STVAL_i$ valor da água (MW-mês/m³/s)

U_i conjuntos das usinas a jusante de i (incluindo a usina i)

– **Valor da água de uma usina considerando sua queda e todas as quedas das usinas a jusante que não estiverem vertendo**

$$STVAL_i = \sum_{K \in U_i} PFACT_K \times TQM_K$$

$STVAL_i$ = valor da água (MW-mês/m³/s)

TQM_k = variável que é zero se a usina estiver vertendo e um se não estiver.

2.8. Energia Armazenada

É calculada a energia armazenada considerando que todos os reservatórios operam em paralelo do ponto em que estão até o volume mínimo. Trata-se de uma aproximação já que a evolução dos valores dos volumes depende da hidrologia futura, prioridades de enchimento e esvaziamento e curvas-guia superiores e inferiores.

A operação em paralelo exige que se calcule um valor da água (MW-mês/m³/s) para cada usina. Toda a água a montante de uma usina utiliza este valor médio.

2.8.1. Cálculo do valor da água médio

2.8.1.1. Usinas com reservatórios

$$ARM_i = \int_{VMIN_i}^{VE_i} \frac{g \cdot d \cdot n_i \cdot h_i(v)}{n_m} dv = 10^6 \frac{VA_i(VE_i - VMIN_i)}{n_m} \dots(1)$$

onde:

ARM_ienergia armazenada (MW-mês) no reservatório usando exclusivamente a altura própria.

VA_i..... valor da água (MW-mês/m³/s): HYGEN_i ÷ QPLT_i se QPLT_i ≠ 0

VMIN_i volume de fim de mês do reservatório (10⁶ m³)

gaceleração da gravidade (9,81 m/s²)

dmassa específica da água (10³ kg/m³)

n_irendimento do conjunto turbina-gerador (por unidade)

n_m números de segundos de um mês médio: 365,25 dias/12 meses*(24 horas*3600 segundos = 2.6298 × 10⁶ segundos

h_i(V)queda líquida (m) em função do volume

Considerando-se que:

$$h_i(V) = FB_i(V) - (CFMED_i + HLOSS_i)$$

onde:

FB_i(V)nível de montante calculado (m) em função do volume, através de um polinômio do quarto grau

HLOSS_iperda hidráulica média nas tubulações (m).

CFMED_icanal de fuga médio (m) informado (que torna o cálculo da energia armazenada independente do canal de fuga médio do mês em curso.

$$\int_{V_{MIN_i}}^{VE_i} h_i(v)dv = \int_{V_{MIN_i}}^{VE_i} [(FB_i(V) - (CFMED_i + HLOSS_i))] dV = PFB_i(VE_i) - PFB_i(V_{MIN_i}) - (CFMED_i + HLOSS)(VE_i - V_{MIN_i}).....(2)$$

onde:

PFB_i = primitiva do polinômio volume x cota

substituindo (2) em (1), as constantes pelos seus valores numéricos e considerando que os volumes são informados em 10⁶ m³, e o resultado desejado, em MW-mês, vem:

$$ARM_i = \frac{10^3 \times 9,81}{2,6298} n_i [PFB(VE_i) - PFB(V_{MIN_i}) - (CFMED_i + HLOSS)_i(VE_i - V_{MIN_i})] e$$

$$VA = 2,6298 \frac{ARM_i}{VE_i - V_{MIN_i}}$$

Os valores calculados acima referem-se ao local de geração . No caso das usinas distantes dos centros de carga deve ser descontado da sua geração o valor correspondente às perdas de transmissão, calculado através de um percentual idêntico para todas usinas, isto é:

$$ARM_i = \frac{10^3 \times 9,81}{2,6298} n_i [PFB(VE_i) - PFB(V_{MIN_i}) - (CFMED_i + HLOSS)_i(VE_i - V_{MIN_i})] \times (1 - NEHY_i \times ENLOSS)$$

onde:

NEHY_i dado de entrada (1 ou 0, conforme deve ou não ser descontado o valor correspondente a perdas em transmissão)

ENLOSS valor das perdas na transmissão (por unidade).

2.8.1.2. Usinas a Fio d'água

Seguindo o raciocínio anterior e considerando que nas usinas a fio d'água o nível de montante é constante e não existe energia armazenada, vem:

$$VA_i = 10^{-3} \times 9.81 (FB_i - HLOSS_i - CFMED_i) \times n_i (1 - NEHY_i \times ENLOSS)$$

onde:

FB_i nível de montante (em m)

2.8.1.3. Cálculo da energia armazenada gerável em cada usina

$$\overline{ARM}_i = VA_i \sum_{j \in M_i} (VE_j - V_{MIN_j})$$

onde:

\overline{ARM}_i = Energia armazenada gerável na usina i (MW-mês)

M_i = conjunto das usinas a montante de i (incluindo a própria usina i)

2.8.1.4. Cálculo da energia armazenada total

$$TEAS = \sum_{i \in U} \overline{ARM}_i$$

onde:

TEASenergia armazenada total no sistema (em MW-mês)

Uconjunto de todas as usinas do sistema.

2.9. Vazão Máxima para Ponta e Energia

2.9.1. Vazão máxima para produção de ponta

$$QMAX = \min(QGEN, QTU)$$

onde:

QMAXvazão m máxima para produção de ponta (m³/s)

QGENvazão m máxima devido a limitação do gerador (m³/s)

QTUvazão m máxima devido a limitação das turbinas (m³/s)

2.9.1.1. Vazão máxima devido ao Gerador

$$QGEN = CAP / (0,00981 H n)$$

onde:

CAPcapacidade efetiva de ponta dos geradores (MW)

hqueda líquida (m) em curso fornecida

nrendimento do conjunto turbina-gerador (por unidade)

2.9.2. Vazão máxima devido as turbinas

$$QTU(I) = ((H/HRATED(I))^{**}BETA) * QTURB(I)$$

onde:

HRATEDqueda líquida de referência (m)

QTURB.....vazão máxima (m³/s) das turbinas quando a queda líquida for HRATED.

BETAExpoente para cada tipo de turbina.

2.10. Operação do Reservatório do AHE Jirau

De maneira que a operação do AHE Jirau não cause interferências no país vizinho, o nível d'água normal do reservatório deverá variar acompanhando as condições naturais do rio Madeira. Para tanto, será utilizada uma curva-guia (arquivo "JIRAU.DAT") informando metas de volume do reservatório, correspondentes aos níveis d'água a serem mantidos em Jirau, em função de diversas condições de vazão afluyente no local.

O volume meta do reservatório de Jirau para o mês corrente será calculado por interpolação linear entre os pontos da curva-guia onde se encontra a vazão afluyente, da seguinte maneira:

$$VE(i) = \begin{cases} \bullet VQLIM(1), se QINFL(i) \leq QLIM(1); \\ \bullet VQLIM(N), se QINFL(i) \geq QLIM(N); \\ \bullet VQLIM(n) + (QINFL(i) - QLIM(n)) \times \left(\frac{VQLIM(n+1) - VQLIM(n)}{QLIM(n+1) - QLIM(n)} \right), \\ \quad se QLIM(n) \leq QINFL(i) \leq QLIM(n+1) \end{cases}$$

onde:

VE(i) volume meta da usina *i* no mês corrente (hm³).

QINFL(i) vazão afluyente à usina *i* no mês corrente (m³/s).

QLIM(n) vazão do ponto *n* da curva-guia (m³/s).

VQLIM(n) volume do ponto *n* da curva-guia (hm³).

N número de pontos fornecidos da curva-guia.

A partir do cálculo do volume meta do reservatório, retorna-se à rotina normal do modelo para o cálculo da produção de energia, onde o modelo procede com os cálculos da correspondente vazões de enchimento ou esvaziamento, evaporada e regularizada, utilizadas na rotina.

Considerações:

- No arquivo dos dados de entrada das usinas deve-se informar os dados de JIRAU como sendo a fio d'água, ou seja, volume mínimo igual ao volume máximo, de maneira que o modelo não a trate como sendo uma usina com reservatório de regularização;
- O modelo utilizará os polinômios PVC e PCA. Portanto, devem ser informados todos os coeficientes dos polinômios, e não apenas o termo independente (como feito usualmente na representação de usinas fio d'água).