

RELATÓRIO TÉCNICO

| | | |
|------------------------------|--------------------------|------------------|
| Nº: DP/DEA – 15009/10 | Nº DE PÁGINAS: 40 | ANEXOS: - |
|------------------------------|--------------------------|------------------|

| |
|---|
| TÍTULO: CONSIDERAÇÃO DO ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO NOS MODELOS SIMHIDR E DESSEM-PAT. |
|---|

| |
|--|
| DEPARTAMENTO: DEPARTAMENTO DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E MEIO AMBIENTE – DEA |
|--|

| | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| ÁREA DE RESPONSABILIDADE: B200 | Nº DO PROJETO: 1399 |
|---------------------------------------|----------------------------|

| | |
|---|--|
| <p>DESTINATÁRIOS:</p> <p>Centrais Elétricas Brasileiras S/A – ELETROBRÁS Av. Presidente Vargas, 409 – 12º andar 20071-003 – Rio de Janeiro / RJ</p> <p>ATENÇÃO: Egidio Schoenberger</p> | <p>EQUIPE DE ACOMPANHAMENTO:</p> <p>Luis Ernesto Areias – ELETROBRÁS Renata Leite Falcão - ELETROBRÁS</p> |
|---|--|

| |
|--|
| RESUMO: Neste Relatório Técnico descreve-se a metodologia de consideração do enchimento de volume morto das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, em particular os módulos SIMHIDR e DESSEM-PAT. A metodologia permite que se realize a simulação hidráulica do sistema e a determinação de um despacho de referência para a programação diária da operação considerando aproveitamentos em construção ou em operação de enchimento de volume morto. |
|--|

| | |
|--|--|
| <p>AUTORES:</p> <p>André Luiz Diniz Souto Lima – CEPEL <i>[Assinatura]</i> Michel Igor de Almeida Ennes – CEPEL <i>[Assinatura]</i> Tiago Norbiato dos Santos – PUC-RJJ <i>[Assinatura]</i></p> | <p>PALAVRAS-CHAVE:</p> <p>Programação diária da operação, simulação hidráulica, programação linear, enchimento de volume morto.</p> <p>CLASSIFICAÇÃO: CONTROLADO</p> |
|--|--|

| | |
|---|---|
| <p><i>[Assinatura]</i></p> <p>GERENTE DO PROJETO</p> <p>NOME: André Luiz Diniz Souto Lima TEL: (21) 2598-6046 FAX: (21) 2598-6482 EMAIL: diniz@cepel.br</p> | <p><i>[Assinatura]</i></p> <p>CHEFE DE DEPARTAMENTO</p> <p>NOME: Maria Elvira Piñeiro Maceira TEL: (21) 2598-6454 FAX: (21) 2598-6482 EMAIL: elvira@cepel.br</p> |
|---|---|

| | |
|---|--|
| <p>APROVAÇÃO</p> <p><i>[Assinatura]</i></p> <p>DIRETOR DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO ROBERTO PEREIRA CALDAS</p> <p><i>[Assinatura]</i></p> | |
|---|--|

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Projeto DESSEM

Relatório Técnico:

**CONSIDERAÇÃO DO ENCHIMENTO DE VOLUME
MORTO NOS MODELOS SIMHIDR E DESSEM-PAT**

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 7 |
| 2. CONCEITUAÇÃO DO ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO..... | 8 |
| 2.1. Reservatórios das usinas hidroelétricas | 8 |
| 2.2. Estados operativos de uma usina | 9 |
| 2.3. Operação de enchimento de volume morto | 10 |
| 3. DADOS PARA O ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO..... | 13 |
| 3.1. Representação dos modos de operação de uma usina | 13 |
| 3.1.1. Usina em Construção ao longo de todo o estudo | 14 |
| 3.1.2. Usina em construção no início e passando a encher volume morto ao longo do estudo | 15 |
| 3.1.3. Usina enchendo volume morto no início e passando a operar hidraulicamente ao longo do estudo | 16 |
| 3.1.4. Usina em operação ao longo de todo o estudo..... | 17 |
| 3.2. Definição do início da Operação Hidráulica e Energética..... | 17 |
| 3.2.1. Início da operação hidráulica | 17 |
| 3.2.2. Início da operação energética..... | 17 |
| 3.3. Fornecimento de Dados | 18 |
| 3.4. Validação e processamento dos Dados..... | 18 |
| 4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DE ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO | 20 |
| 4.1. Durante a fase de construção da usina | 20 |
| 4.2. Para os períodos em que a usina está enchendo volume morto | 20 |
| 4.2.1. Equação de balanço hídrico da usina <i>i</i> | 21 |
| 4.2.2. Limites de variáveis | 21 |
| 4.2.3. Cálculos feitos externamente ao PL..... | 22 |
| 4.2.4. Violação da equação de balanço hídrico..... | 22 |
| 4.3. Para os períodos em que a usina está em operação hidráulica e energética ... | 22 |
| 4.4. Para os períodos de início da operação hidráulica e energética..... | 23 |
| 4.4.1. Período de início da operação hidráulica (no exemplo, período 14) | 23 |
| 4.4.2. Período de início da operação energética (no exemplo, período 15)..... | 24 |
| 4.5. Considerações adicionais..... | 24 |
| 4.5.1. Evaporação para usinas com enchimento de volume morto..... | 24 |
| 5. RELATÓRIOS DE SAÍDA..... | 25 |
| 6. ESTUDO DE CASO | 26 |
| 6.1. Dados gerais do estudo | 26 |
| 6.2. Dados de enchimento de volume morto | 27 |
| 6.2.1. Dados do arquivo ENTDAADOS.XXX | 27 |
| 6.2.2. Dados do arquivo SIMUL.XXX | 29 |
| 6.3. Resolução do problema..... | 29 |
| 6.4. Relatórios de enchimento de volume morto | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 6.4.1. Relatório com os dados de enchimento de volume morto (ECO_VMOR.XXX) | 31 |
| 6.4.2. Relatório de enchimento de volume morto (SIM_VMOR.XXX / PDO_VMOR.XXX) | 32 |
| 6.4.3. Relatório de balanço hídrico (PDO_OPERACAO, SIM_OPERACAO) | 34 |
| 6.4.4. Inviabilidades na operação de enchimento (LOG_INVIAB.XXX)..... | 35 |
| 6.5. Tempo Computacional..... | 37 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 39 |
| 8. REFERÊNCIAS..... | 40 |

Siglas e Nomenclatura

- PDO:** Programação diária da Operação;
- Período:** Cada intervalo de tempo na discretização do problema;
- Horizonte:** Soma das durações de todos os períodos: corresponde ao horizonte de tempo ao longo do qual se deseja realizar a programação do sistema.
- RHS:** Termo independente de uma equação ou inequação em um problema de programação matemática. Corresponde ao valor numérico do lado direito da expressão (“right hand side”).

Notação:

- $f_{VM_i}^t$: Violação na restrição de balanço hídrico da usina hidroelétrica i , no instante t , decorrente de insuficiência de vazão afluente;
- GH_i^t : Geração da usina hidroelétrica i , no instante t ;
- I_i^t : Vazão incremental natural à usina hidroelétrica i , no instante t ;
- M_i : Conjunto de usinas à montante da usina i ;
- Q_i^t : Turbinamento da usina hidroelétrica i , no instante t ;
- $Q_{def_{adic_i}}^t$: Defluência adicional para a usina hidroelétrica i , no instante t , decorrente de excesso de vazão afluente durante a operação de enchimento de volume morto;
- S_i^t : Vertimento da usina hidroelétrica i , no instante t ;
- τ_{ji} : Tempo de viagem da água entre as usinas j e i ;
- $Tax_{VM_i}^t$: Taxa de enchimento usina hidroelétrica i , no instante t .
- $Tax_{DF_i}^t$: Taxa de descarga de fundo da usina hidroelétrica i , no instante t .
- V_i^t : Volume armazenado da usina hidroelétrica i , ao final do instante t ;

1. INTRODUÇÃO

O programa DESSEM-PAT [1] é um modelo desenvolvido pelo CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica para ser utilizado como ferramenta de apoio para a otimização da programação diária da operação (PDO) de sistemas hidrotérmicos, com um horizonte de até duas semanas e discretização temporal em patamares cronológicos de duração mínima de 1 hora. Além de representar o atendimento à demanda e à reserva de potência do sistema, o modelo DESSEM-PAT representa de forma detalhada a rede elétrica (carga por barra, modelagem DC, restrições de limites de fluxo nos circuitos, etc.), a operação das usinas hidroelétricas (balanço hídrico, função de produção não linear, tempo de viagem da água, restrições operativas de limite e variação, etc...), e os recursos de geração térmica (limites de capacidade e custos incrementais lineares de geração).

Este programa se insere no escopo do projeto DESSEM, desenvolvido pelo CEPEL desde 1998, no qual se incluem também dois outros programas: (i) o modelo DESSEM-UC [2], com horizonte de 1 dia e discretização semi-horária, que considera de forma detalhada as restrições de *unit commitment* das unidades geradoras ; (ii) o modelo SIMHIDR (Simulação Hidráulica) [3], que simula a operação dos reservatórios a partir de um despacho já programado para a geração. No contexto de utilização dos modelos DESSEM-PAT e DESSEM-UC, o modelo SIMHIDR se torna um módulo preliminar, que tem por objetivo obter as condições do sistema no início do horizonte de otimização (por exemplo, volumes armazenados nos reservatórios e defluências passadas para usinas com tempo de viagem).

Este Relatório descreve a funcionalidade de enchimento de volume morto das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, de acordo com a seguinte estrutura: no capítulo 2, faz-se uma descrição conceitual do enchimento de volume morto; no capítulo 3, descrevem-se os dados de entrada associados a essa funcionalidade; no capítulo 4, apresenta-se a formulação matemática de suas variáveis e restrições; no capítulo 5, descrevem-se os arquivos de saída; no capítulo 6, apresenta-se um estudo de caso ilustrativo com o sistema real brasileiro e, no capítulo 7, apresentam-se as conclusões do estudo dessa funcionalidade.

Embora a metodologia seja a mesma para os programas DESSEM-PAT, DESSEM-UC e SIMHIDR, um enfoque maior será dado para a utilização dessa funcionalidade nos modelos DESSEM-PAT e SIMHIDR.

2. CONCEITUAÇÃO DO ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição básica dos elementos da operação de sistemas hidrotérmicos que estão associados ao enchimento de volume morto dos reservatórios, assim como a descrição conceitual dessa funcionalidade.

2.1. Reservatórios das usinas hidroelétricas

O reservatório das usinas hidroelétricas pode ser dividido em duas regiões, de acordo com o seu volume de água total (V_{tot}) armazenado:

- uma região que vai desde $V_{tot} = 0$ até $V_{tot} = V_{min}$, onde V_{min} é um dado cadastral. Nessa região, o volume útil da usina (V_{util} , ou simplesmente V) vale zero e o seu volume morto (V_{mor}) assume um valor entre 0 e V_{min} . Nesta situação, a usina está impedida de gerar;
- uma região que vai desde $V_{tot} = V_{min}$ até $V_{tot} = V_{max}$. Nessa região, o volume útil da usina assume um valor entre 0 e \bar{V} , onde \bar{V} é o volume útil armazenado máximo, dado pela diferença ($V_{max} - V_{min}$).

A unidade utilizada para o volume armazenado é hm^3 . Entretanto, muitas vezes é conveniente representar o volume útil armazenado através de um percentual do volume útil máximo \bar{V} , conforme mostra a expressão (2.1) a seguir:

$$V(\%) = \frac{V_{tot} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100, \quad (2.1)$$

Da mesma forma, o volume morto pode ser representado como um % do volume morto máximo:

$$V_{mor}(\%) = \frac{V_{mor}}{V_{min}} \times 100, \quad (2.2)$$

A Figura 2.1 ilustra as diversas variáveis relacionadas ao armazenamento de uma usina hidroelétrica.

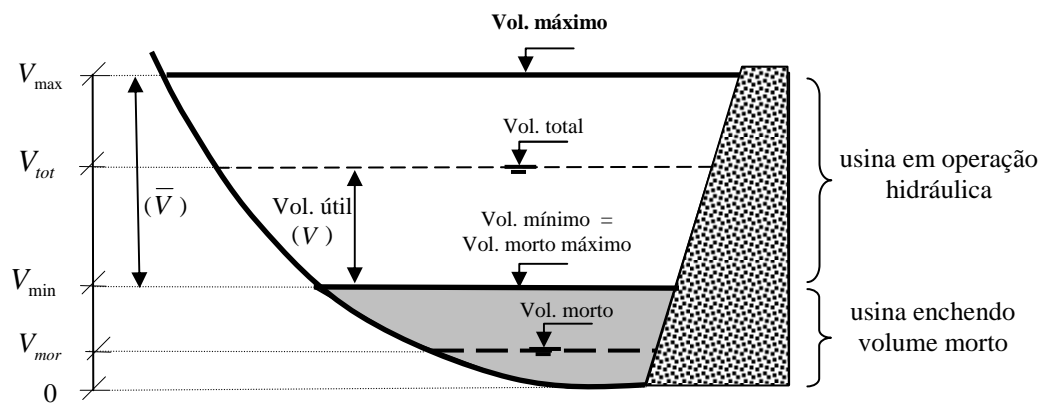


Figura 2.1 - Regiões em que se subdivide o reservatório de uma usina hidroelétrica.

2.2. Estados operativos de uma usina

Antes de entrar em operação em definitivo, o reservatório de uma usina passa pelas fases de construção e enchimento de volume morto. Assim, no modelo DESSEM-PAT um reservatório pode estar em um desses três estados:

- **em construção:** a barragem (e a usina, propriamente dita) ainda está em fase de construção civil;
- **em enchimento de volume morto:** a barragem já está construída, e a usina está enchendo o seu volume morto de forma a atingir o volume mínimo operativo (V_{\min}). Neste período, a usina não pode gerar energia elétrica, mas pode defluir água para jusante através de descarga de fundo ou desvio de água. O armazenamento da usina é representado nos arquivos de entrada e saída (E/S) do modelo DESSEM-PAT através do seu volume morto (em hm^3 ou em % do volume morto total), que é numericamente igual ao seu volume total;
- **em operação hidráulica:** a usina já encheu o seu volume morto, e seu volume passa a ser representado nos arquivos de E/S do modelo através do seu volume útil (em hm^3 ou em % do volume útil total). Nesta situação, a usina jamais irá operar abaixo de seu volume mínimo.
- **em operação e energética:** considera-se que a usina está em operação energética quando pelo menos uma de suas unidades geradoras já estiver comissionada. Entretanto, a capacidade de geração da usina dependerá dos dados de manutenção programada (registros MH), das restrições operativas da usina (registros RE ou arquivo OPERUH) e da conclusão da própria operação de enchimento de volume morto, uma vez que o volume mínimo do

reservatório é calculado de forma a se ter altura de queda mínima necessária para a operação das máquinas.

A sequência cronológica dos estados operativos da usina é apresentada na Figura 2.2. Na seção 3.1, descreve-se como cada um desses estados é representado no modelo DESSEM-PAT. Observa-se que a operação hidráulica é condição necessária para a operação energética da usina.

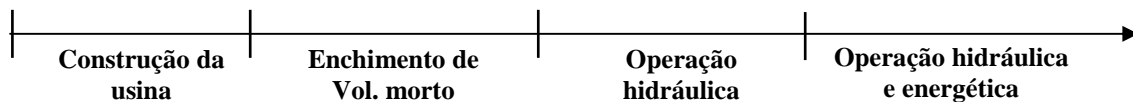


Figura 2.2 - Diagrama cronológico dos estados para o reservatório de uma usina hidroelétrica.

A seguir, descreve-se com mais detalhes a operação de enchimento de volume morto de uma usina hidroelétrica, que é o tema central desse relatório.

2.3. Operação de enchimento de volume morto

Uma vez terminada a fase de construção da usina, e antes que esta inicie sua geração hidroelétrica, é necessário o procedimento de enchimento de volume morto. Como esta atividade leva um longo período de tempo para ser concluída¹, é preciso representá-la adequadamente nos modelos de planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A operação de enchimento de volume morto compreende as seguintes variáveis:

- **taxa de enchimento** ($Tax_{ench} - m^3/s$): expressa a taxa (vazão) com que o volume morto da usina deve ser preenchido;
- **taxa de descarga de fundo** ($Tax_{DF} - m^3/s$): expressa uma vazão mínima que deve ser atendida para o trecho de rio imediatamente à jusante da usina;

A Figura 2.3 ilustra essas variáveis durante o enchimento do volume morto da usina:

¹ O enchimento de volume morto é um procedimento que pode durar vários meses.

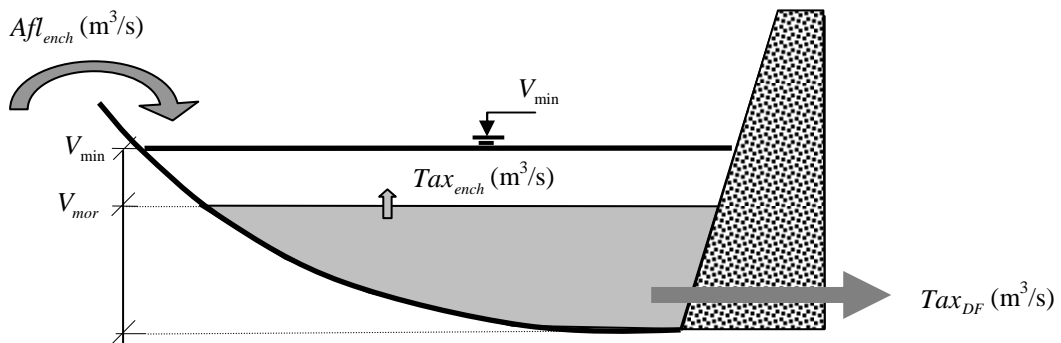


Figura 2.3 - Variáveis relacionadas ao enchimento de volume morto de uma usina hidroelétrica.

Com base nos valores de Tax_{ench} e Tax_{DF} é possível se determinar duas outras variáveis importantes para o balanço hídrico dessa usina nos modelos SIMHIDR ou DESSEM-PAT:

- **Índice do instante (período) de entrada em operação hidráulica da usina**, que é obtido a partir das informações do volume morto no início do estudo e da taxa de enchimento prevista ao longo do estudo. Ressalta-se que a usina pode não entrar em operação até o final do horizonte de estudo do modelo;
- **Afluência mínima à usina em cada intervalo de tempo (Afl_{ench})**, obtida através da soma dos valores de Tax_{DF} e Tax_{ench} . Esse valor corresponde à vazão mínima que deve afluir à usina de forma a atender simultaneamente às taxas de enchimento e descarga de fundo

Ressalta-se que, no modelo DESSEM, todas as grandezas Tax_{DF} , Tax_{ench} e Afl_{ench} podem ter seus valores variáveis ao longo do tempo.

De forma a manter a taxa de enchimento da usina no valor previsto para a mesma, se a afluência incremental natural (I) à usina em um dado instante de tempo for menor do que o valor de Afl_{ench} nesse mesmo instante, o(s) reservatório(s) de montante deve(m) contribuir para o enchimento da usina, através de turbinamento (Q) ou vertimento (S). Por outro lado, caso I seja maior do que Afl_{ench} , é preciso que, além da descarga de fundo Tax_{DF} , a usina realize uma defluência adicional, denotada neste relatório de $Qdefl_{adic}$.

A Figura 2.4 ilustra o enchimento de volume morto de uma usina A, que possui duas usinas B e C imediatamente à montante. Todas as variáveis apresentadas nessa figura são consideradas

na modelagem matemática do enchimento de volume morto, apresentada ao longo deste documento.

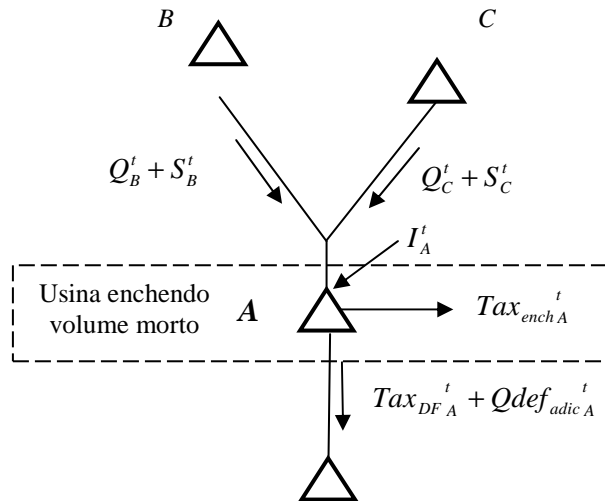


Figura 2.4 - Esquema em planta para o enchimento de volume morto de uma usina hidrelétrica (A)

3. DADOS PARA O ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO

Nesta seção, descrevem-se os dados de entrada necessários para representar o enchimento de volume morto nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT. Tal como ilustrado na seção anterior, considera-se que a usina submetida ao enchimento de volume morto é a usina A, que possui duas usinas à montante (B e C), e uma usina à jusante D, conforme mostrado novamente na Figura 3.1.

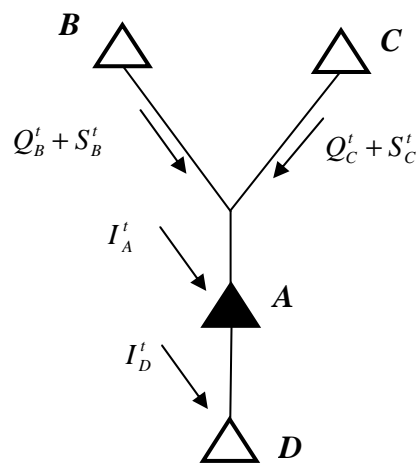


Figura 3.1 - Topologia hidráulica na vizinhança da usina A, submetida a uma operação de enchimento de volume morto.

Os dados de entrada mencionados nessa seção são relacionados posteriormente na Tabela 3.1, e descritos com mais detalhes no Manual do Usuário do modelo [1].

3.1. Representação dos modos de operação de uma usina

A seguir, descreve-se como é feita a representação, no modelo, dos estados operativos do reservatório, descritos na seção 2.2. Ressalta-se que, em um mesmo estudo, pode haver mais de um estado operativo, caso o horizonte de estudo compreenda o instante de tempo em que ocorra a mudança de estado. Portanto, consideram-se todas as combinações possíveis de estados ao longo do estudo.

Devido ao curto horizonte de tempo do modelo, não se considerou a hipótese da usina apresentar as fases de construção, enchimento de volume morto e operação hidráulica em um mesmo estudo. Entretanto, tal situação pode ser contemplada pelo modelo.

Ressalta-se que as instruções a seguir são válidas independentemente se cada estado operativo ocorre ao longo do período de simulação ou de otimização do modelo DESSEM-PAT.

3.1.1. Usina em Construção ao longo de todo o estudo

Neste caso, a usina pode ser ignorada na configuração do sistema, ou seja, a vazão defluente das usinas de montante *B* e *C* passa diretamente para a usina de jusante *D*. Portanto, neste caso:

- o usuário não deve incluir a usina *A* na configuração do estudo (arquivo DADVAZ);
- caso as vazões naturais afluentes às usinas sejam fornecidas por meio de vazões incrementais¹, a vazão incremental à usina *A* deverá ser somada à vazão incremental da usina *D*.

A Figura 3.2 ilustra este tipo de representação:

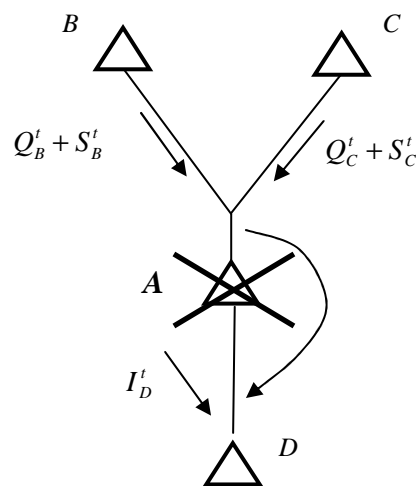


Figura 3.2 - Representação de uma usina que se encontra em construção durante todo o horizonte de estudo.

Caso, por questões de manipulação de dados, seja necessário incluir a usina *A* na configuração do estudo, o usuário pode adotar um procedimento alternativo:

- declarar a usina como enchendo volume morto, com volume morto inicial igual a zero,
- indicar o valor “F” (após o final do estudo) para a data de início de comissionamento das máquinas;
- informar valores nulos para as taxas de enchimento Tax_{ench} e descarga de fundo Tax_{DF} para a usina *A* ao longo de todo o estudo;

¹ No modelo DESSEM, as vazões naturais às usinas hidrelétricas podem ser fornecidas tanto em vazão total como incremental.

- declarar normalmente a vazão natural afluyente (total ou incremental) referente à usina A ao longo de todo o estudo.

Desta forma, esta segunda alternativa de representação pode ser interpretada como a usina enchendo volume morto, porém com taxas nulas de enchimento e descarga de fundo. Assim, as defluências da usina serão feitas somente por meio de defluências adicionais $Q_{def_{adic}}$, conforme detalhado na seção 3.1.2.

3.1.2. Usina em construção no início e passando a encher volume morto ao longo do estudo

Caso a usina inicie o seu enchimento no decorrer do horizonte de estudo, é obrigatório representá-la na configuração ao longo de todo o horizonte de estudo. Portanto, os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- declarar a usina como enchendo volume morto, com volume morto inicial igual a zero, e com um valor “F” (após o final do estudo) para a data prevista de comissionamento das máquinas;
- informar valores nulos para as taxas de enchimento Tax_{ench} e descarga de fundo Tax_{DF} para a usina A ao longo do período em que a usina está em construção. Após esse instante, devem-se declarar normalmente as taxas de enchimento Tax_{ench} e descarga de fundo Tax_{DF} para a usina;
- informar normalmente a vazão natural afluyente (total ou incremental) referente à usina A ao longo de todo o estudo.

Esta situação também pode ser interpretada como a usina enchendo volume morto ao longo de todo o estudo, porém com taxas de enchimento e descarga de fundo nulas no período anterior ao efetivo enchimento. A Figura 3.3 ilustra como se dará, nas variáveis do modelo, a operação da usina antes e após o instante I_{enchA} de início do enchimento.

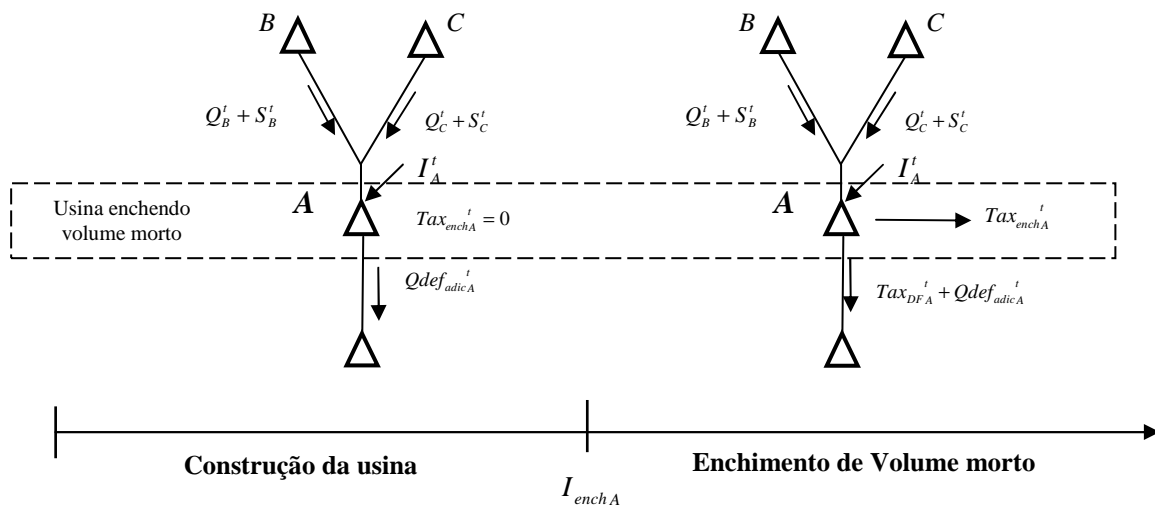


Figura 3.3 - Representação de uma usina que se encontra parte do tempo em construção e parte do tempo em enchimento de volume morto, durante o horizonte de estudo.

Ressalta-se que não é necessário informar ao modelo o instante em que a usina inicia efetivamente seu enchimento, já que isso estará sinalizado pelo primeiro instante em que a taxa de enchimento for diferente de zero.

3.1.3. Usina enchendo volume morto no início e passando a operar hidráulicamente ao longo do estudo

Nesta situação, a usina inicia o estudo enchendo volume morto, com previsão de término de enchimento durante o período de estudo. Os seguintes procedimentos deverão ser adotados:

- declarar a usina como enchendo volume morto desde o início do estudo, com um determinado valor de volume morto inicial;
- informar a data de comissionamento (início da operação energética) da usina;
- informar as taxas de enchimento Tax_{ench} e descarga de fundo Tax_{DF} para a usina A ao longo do estudo
- declarar normalmente a vazão natural afluyente (total ou incremental) referente à usina A ao longo de todo o estudo.

A Figura 3.4 ilustra esta situação.

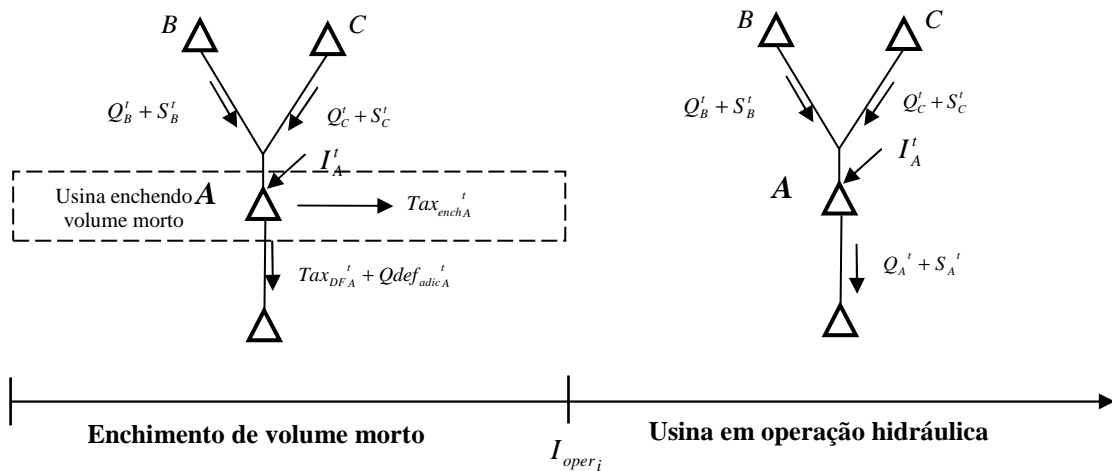


Figura 3.4 - Representação de uma usina que se encontra parte do tempo em enchimento de volume morto e parte do tempo em operação hidráulica, durante o horizonte de estudo.

3.1.4. Usina em operação ao longo de todo o estudo

Neste caso, não há enchimento de volume morto e a usina é representada da forma usual, como todas as demais usinas em operação do sistema.

3.2. Definição do início da Operação Hidráulica e Energética

Conforme descrito na seção 2.2, a “operação hidráulica” da usina se inicia no instante de tempo em que o volume morto é preenchido, ou seja, a partir do qual não haverá mais enchimento de volume morto nem descarga de fundo, e a usina poderá realizar vertimentos¹ ou desvios (se for o caso).

Por outro lado, a “operação energética” corresponde ao instante de tempo em que a usina está habilitada a gerar energia.

3.2.1. Início da operação hidráulica

A data de início da operação hidráulica corresponde ao instante de tempo em que o volume morto é completamente preenchido. Este instante é calculado automaticamente pelo modelo, com base nos dados de volume morto inicial e taxas de enchimento ao longo do estudo, fornecidos pelo usuário.

3.2.2. Início da operação energética

¹ Respeitada a cota de soleira do vertedouro.

Em princípio, a usina já pode realizar sua operação energética a partir do instante em que inicia a sua operação hidráulica. Entretanto, o comissionamento das unidades geradoras (máquinas) da usina pode ocorrer posteriormente ao instante de tempo em que se completa o enchimento do volume morto. Neste caso, o usuário deve informar, nos registros UH, o instante de tempo em que a usina inicia a sua operação energética.

3.3. Fornecimento de Dados

Os dados específicos para representação do enchimento de volume morto para uma determinada usina hidroelétrica i , assim como sua localização nos arquivos / registros de entrada de dados, são indicados na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Dados de entrada para representação do enchimento de volume morto para a usina hidroelétrica i .

| Dado | Notação | Localização |
|---|--------------------|--------------|
| Instante de tempo em que a usina inicia sua operação energética | T_{inic}^{energ} | Registro UH |
| Volume morto no início do estudo (hm^3) | V_{mori}^0 | Registro UH |
| Taxa de enchimento de volume morto ao longo do estudo, até a entrada em operação hidráulica (m^3/s) | Tax_{VMi}^t | Registros VM |
| Taxa de descarga de fundo ao longo do estudo, até a entrada em operação hidráulica (m^3/s) | Tax_{DFi}^t | Registros DF |

Ressalta-se que, se o estudo possuir um período de simulação hidráulica, o início do estudo corresponde ao início do período de simulação. Para mais detalhes sobre as unidades e valores válidos para cada uma dessas variáveis, consulte o Manual do Usuário do modelo [1].

3.4. Validação e processamento dos Dados

A partir dos valores de V_{mori}^0 e Tax_{VMi}^t informados pelo usuário, o modelo calcula o exato instante de tempo (meia hora) em que a usina inicia sua operação hidráulica (T_{inic}^{hidr}). Este valor é comparado com o instante de tempo de início da operação energética (T_{inic}^{energ}), informado pelo usuário nos registros UH (vide Tabela 3.1). Pode-se ter então:

- $T_{inic}^{hidr} = T_{inic}^{energ}$: nesta situação, a usina já poderá gerar no exato instante em que completar o enchimento de seu volume morto;

- $T_{inic}^{hidr} < T_{inic}^{energ}$: nesta situação, a usina iniciará sua operação hidráulica no instante T_{inic}^{hidr} , a partir do qual já poderá preencher o seu volume útil. Entretanto, a usina só poderá gerar a partir do instante T_{inic}^{energ} . Portanto, no intervalo de tempo compreendido entre T_{inic}^{hidr} e T_{inic}^{energ} a usina irá operar somente como reservatório.
- Se $T_{inic}^{hidr} > T_{inic}^{energ}$: nesta situação, apesar das unidades geradoras estarem disponíveis para geração a partir do instante T_{inic}^{energ} , a usina só poderá gerar a partir do instante T_{inic}^{hidr} . No intervalo de tempo compreendido entre T_{inic}^{energ} e T_{inic}^{hidr} , a usina estará enchendo volume morto.

A Figura 3.5 ilustra os modos operativos da usina nessas três situações:

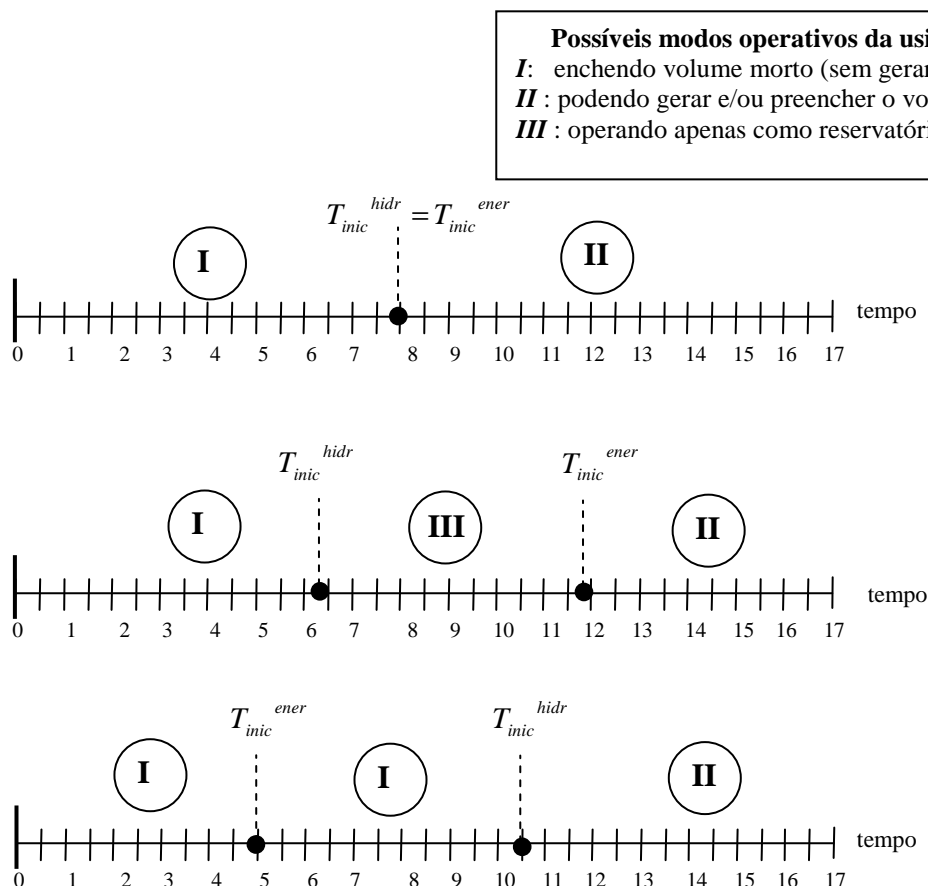


Figura 3.5 - Esquema ilustrativo da validação do início da operação hidráulica

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DE ENCHIMENTO DE VOLUME MORTO

Nesta seção, apresenta-se a formulação matemática do enchimento de volume morto, considerando-se uma determinada usina i . A extensão dessa modelagem para várias usinas enchendo volume morto é imediata.

A formulação dessas restrições em cada período t depende do estado operativo do reservatório nesse período (vide seção 2.2), conforme descrito a seguir.

4.1. Durante a fase de construção da usina

Caso seja adotada a primeira forma de representação descrita na seção 3.1.1, a usina não é representada no estudo, portanto é como se não houvesse operação de enchimento de volume morto. Entretanto, caso esta fase seja representada como um enchimento de volume morto com taxa nula, a modelagem é semelhante à descrita na seção 4.2.

4.2. Para os períodos em que a usina está enchendo volume morto

Neste caso, a usina deve atender às taxas de enchimento e descarga de fundo fornecidas pelo usuário. Eventuais excessos de vazão afluyente são tratados através de “defluências adicionais” (Q_{def}), e a impossibilidade de realizar o enchimento é contornada com a utilização de variáveis de folga (f_{VM}), que possuem custo muito alto na função objetivo. A operação da usina é ilustrada na Figura 4.1.

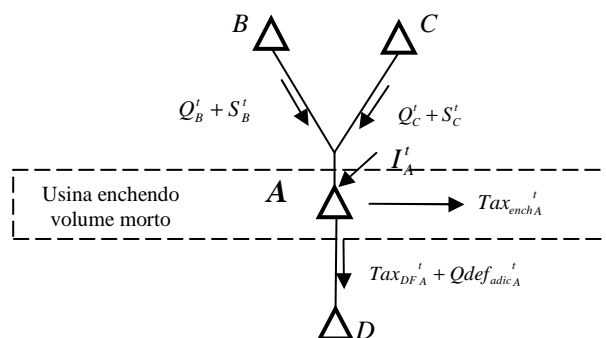


Figura 4.1 - Esquema ilustrativo de uma usina A, enchendo volume morto.

As expressões matemáticas das restrições e variáveis associadas a essa funcionalidade são descritas a seguir.

4.2.1. Equação de balanço hídrico da usina i

No problema linear (PL) resolvido pelos modelos SIMHIDR / DESSEM-PAT, a variável “volume armazenado” corresponde apenas ao volume útil. Assim, como a usina está enchendo volume morto, o seu volume é sempre zero, e a restrição de balanço hídrico será dada por:

$$\underbrace{Tax_{VM_i}^t + Qdef_{adic_i}^t + Tax_{DF_i}^t}_{\text{Vazão que sai da usina}} = I_i^t + \underbrace{\sum_{j \in M_i} (Q_j^{t-\tau_{ji}} + S_j^{t-\tau_{ji}})}_{\text{Vazão que chega à usina}} + f_{VM_i}^t,$$

onde M_i é o conjunto de usinas à montante da usina i e τ_{ji} é o tempo de viagem da água entre as usinas j e i .

Colocando as variáveis de decisão do lado esquerdo e os valores já conhecidos do lado direito, tem-se:

$$Qdef_{adic_i}^t - \sum_{j \in M_i} (Q_j^{t-\tau_{ji}} + S_j^{t-\tau_{ji}}) - f_{VM_i}^t = I_i^t - Tax_{VM_i}^t - Tax_{DF_i}^t, \quad (4.1)$$

onde se percebe que a vazão de enchimento $Tax_{VM_i}^t$ é contabilizada como uma vazão que sai da usina, já que essa água de enchimento “some” do sistema, por não se traduzir em volume útil no reservatório.

Em resumo, o procedimento realizado em (4.1) é abater a vazão afluyente imposta ao reservatório (ou seja, a soma da vazão de enchimento com a vazão que deve ser defluída por descarga de fundo) da vazão natural afluyente. Caso o resultado dessa subtração seja positivo (ou seja, “sobrou água”), a usina i irá realizar uma defluência adicional $Qdef_{adic_i}^t$, a qual, na prática, corresponde a um “vertimento” para a usina de jusante. Por outro lado, caso o resultado seja negativo, é preciso que as usinas de montante defluam água de forma a abastecer o reservatório i . Caso isso não seja possível, aciona-se a variável de folga $f_{VM_i}^t$.

4.2.2. Limites de variáveis

Como a usina não se encontra ainda em operação hidráulica, os limites das variáveis de operação energética são:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq Q_i^t \leq 0; \\
 0 &\leq S_i^t \leq 0; \\
 0 &\leq V_i^t \leq 0; \\
 0 &\leq GH_i^t \leq 0,
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

enquanto as variáveis utilizadas na equação de balanço hídrico assumem os limites:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq Qdef_{adici}^t \leq +\infty; \\
 0 &\leq f_{VMi}^t \leq (Tax_{VMi}^t - Tax_{DFi}^t).
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Note que o limite superior para a folga f_{VMi}^t corresponde ao máximo déficit de água que pode ocorrer na usina devido à operação de enchimento, o qual ocorreria no caso extremo em que sua vazão afluyente (soma da vazão incremental natural com a defluência de usinas de montante) seja nula. Para a variável $Qdef_{adici}^t$, não é prudente estabelecer um limite, visto que não se tem controle sobre o valor máximo de vazão defluente das usinas de montante¹.

4.2.3. Cálculos feitos externamente ao PL

Externamente ao PL, o modelo realiza o cálculo do volume morto final da usina i , com base na taxa de enchimento estabelecida para a usina. Este volume é impresso nos relatórios de saída referentes ao enchimento de volume morto.

4.2.4. Violação da equação de balanço hídrico

Quando a variável de folga f_{VMi}^t é ativada, o modelo se comporta da seguinte forma:

- reporta-se uma violação na restrição de balanço hídrico da usina i , devido à restrição de enchimento de volume morto;
- prossegue-se normalmente o balanço hídrico para a usina i e suas usinas de jusante para os estágios anteriores, como se a taxa de enchimento da usina i tivesse sido atendida. Além disso, os relatórios de volume morto mostrarão um enchimento normal da usina.

4.3. Para os períodos em que a usina está em operação hidráulica e energética

Neste caso, a equação de balanço hídrico é construída da forma tradicional, como mostrado abaixo:

¹ Na verdade, há um limite máximo, que é estabelecido implicitamente pelos limites impostos às variáveis de turbinamento e vertimento das usinas de montante.

$$V_i^t - \sum_{j \in M_i} (Q_j^{t-\tau_{ji}} + S_j^{t-\tau_{ji}}) = V_i^{t-1} + I_i^t, \quad (4.4)$$

onde, por simplicidade de exposição, não se consideram eventuais termos adicionais, como por exemplo vazão evaporada e retirada de água para outros usos.

4.4. Para os períodos de início da operação hidráulica e energética

Conforme descrito na seção 3.4, o modelo dispõe dos exatos instantes de tempo (meia-hora) em que a usina inicia sua operação hidráulica e energética. Entretanto, não necessariamente esses instantes coincidirão com o início de determinado período na discretização temporal do modelo. A Figura 4.2 ilustra essa situação, considerando um exemplo hipotético onde ambos os instantes de início de operação hidráulica e energética ocorrem em um mesmo dia:

- início da operação hidráulica: às 07:00, ou seja, no meio do período 14, que se inicia às 06:00 e termina às 10:00;
- Início da operação energética: às 12:00, ou seja, no meio do período 15, que se inicia às 10:00 e termina às 17:00;

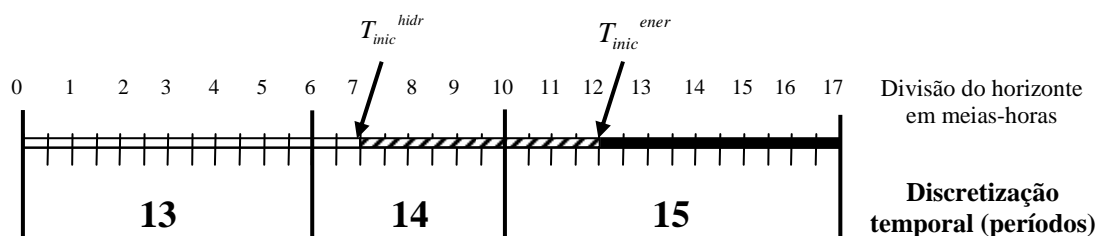


Figura 4.2 - Esquema ilustrativo da validação do início da operação hidráulica.

Pode-se perceber que, nos períodos 14 e 15, a usina apresenta modos de operação “híbridos”: para o período 14, encontra-se em enchimento em 1/4 do intervalo e em operação como reservatório em 3/4 do intervalo; já para o período 15, encontra-se 2/7 do tempo operando como reservatório e 5/7 do tempo operando com disponibilidade de geração.

Nestes dois tipos de situação, a modelagem matemática das restrições para a usina em questão será feita da seguinte forma:

4.4.1. Período de início da operação hidráulica (no exemplo, período 14)

A formulação matemática é uma “mescla” das expressões (4.1) e (4.4). Ou seja, ao mesmo tempo em que se subtrai do RHS¹ da restrição os valores referentes às taxas de enchimento e descarga de fundo no período, permite-se que o reservatório preencha o seu volume útil ao final do período.

$$V_i^{t+1} - \sum_{j \in M_i} (Q_j^{t-\tau_{ji}} + S_j^{t-\tau_{ji}}) + (Q_i^t + S_i^t) + f_{BHID}^- - f_{BHID}^+ = V_i^t + I_i^t - Tax_{VM_i}^t - Tax_{DF_i}^t \quad (4.5)$$

Naturalmente, os valores em hm^3 de $Tax_{VM_i}^t$ e $Tax_{DF_i}^t$ são calculados considerando-se a duração de tempo, no período, em que a usina efetivamente está enchendo volume morto. De forma similar, os valores máximos em hm^3 para as variáveis Q_i^t e S_i^t são obtidos considerando-se apenas a duração de tempo, no período, em que a usina está em operação. Não é mais necessário utilizar a variável de folga $Qdef_{adici}^t$, pois nesse instante são introduzidas as variáveis de folga usuais f_{BHID}^- e f_{BHID}^+ para violação do limite inferior / superior da restrição de balanço hídrico.

4.4.2. Período de início da operação energética (no exemplo, período 15)

Neste caso, a equação de balanço hídrico é exatamente igual a (4.4), quando a usina já está plenamente em operação hidráulica e energética. Entretanto, a duração de tempo em que a usina está sem máquinas (no exemplo, entre as 10:00 e 12:00) é descontada no cálculo da capacidade de geração da usina no período², em MWh.

4.5. Considerações adicionais

4.5.1. Evaporação para usinas com enchimento de volume morto

Conforme descrito em [4], o polinômio área-cota no arquivo de cadastro das usinas hidroelétricas só está ajustado para o intervalo de volume correspondente ao volume útil da usina, ou seja, entre os valores de V_{\min} e V_{\max} . Desta forma, apesar de não haver dificuldades do ponto de vista metodológico, não é possível considerar a evaporação para usinas que estão enchendo volume morto, já que não se dispõem dos valores de área do espelho d’água correspondentes a valores de volume inferiores a V_{\min} .

¹ costuma-se chamar de RHS (“right hand side”) ao valor do lado direito de uma equação / inequação de um problema de otimização.

² de forma semelhante como é feito com os dados de manutenção programada, nos registros MH e MT.

5. RELATÓRIOS DE SAÍDA

Os relatórios referentes à funcionalidade de enchimento de volume morto das usinas hidroelétricas são mostrados nos arquivos relacionados a seguir:

- **ECO_VMOR:** Reprodução dos dados fornecidos pelo usuário para enchimento de volume morto das usinas;
- **SIM_VMOR:** Relatório detalhado de enchimento de volume das usinas hidroelétricas, durante o horizonte de simulação;
- **PDO_VMOR:** Relatório detalhado de enchimento de volume das usinas hidroelétricas, durante o horizonte de otimização.

No estudo de caso realizado na seção 6, ilustram-se em detalhe esses relatórios.

6. ESTUDO DE CASO

Nesta seção ilustra-se a utilização da funcionalidade de volume morto nos modelos do projeto DESSEM, tomando-se como exemplo um estudo de caso com o modelo DESSEM-PAT, contendo ambos os horizontes de simulação e otimização.

6.1. Dados gerais do estudo

O estudo contém uma série de dados referentes à configuração do sistema e restrições operativas. Serão relacionados nesta seção apenas os dados referentes ao horizonte de estudo e discretização temporal para a simulação e otimização, os quais são necessários para o entendimento dos resultados da funcionalidade de enchimento de volume morto apresentados neste relatório. Os dados nos arquivos de entrada do modelo DESSEM-PAT referentes a estas informações são reproduzidos na Figura 6.1.

| | | | | | | | |
|------|----|----|----|-------|-------|------|---------|
| | εX | dd | hr | mh | durac | rede | Patamar |
| | & | XX | XX | X | XXXXX | X | XXXXXX |
| | TM | 31 | 0 | 0 | 7.0 | | LEVE |
| | TM | 31 | 7 | 0 | 10.0 | | MEDIA |
| | TM | 31 | 17 | 0 | 5.0 | | PESADA |
| | TM | 31 | 22 | 0 | 2.0 | | MEDIA |
| | TM | 1 | 0 | 0 | 7.0 | | LEVE |
| | TM | 1 | 7 | 0 | 10.0 | | MEDIA |
| | TM | 1 | 17 | 0 | 5.0 | | PESADA |
| | TM | 1 | 22 | 0 | 2.0 | | MEDIA |
| | TM | 2 | 0 | 0 | 7.0 | | LEVE |
| | TM | 2 | 7 | 0 | 10.0 | | MEDIA |
| | TM | 2 | 17 | 0 | 5.0 | | PESADA |
| | TM | 2 | 22 | 0 | 2.0 | | MEDIA |
| DISC | | | | | | | |
| & | dd | Hr | Mn | DUR | Restr | | |
| & | XX | XX | X | XXXXX | X | | |
| | 29 | 00 | 0 | 12 | | | |
| | 29 | 12 | 0 | 12 | | | |
| | 30 | 00 | 0 | 12 | | | |
| | 30 | 12 | 0 | 12 | | | |
| FIM | | | | | | | |
| | TM | 3 | 0 | 0 | 7.0 | | LEVE |
| | TM | 3 | 7 | 0 | 10.0 | | MEDIA |
| | TM | 3 | 17 | 0 | 5.0 | | PESADA |
| | TM | 3 | 22 | 0 | 2.0 | | MEDIA |
| | TM | 4 | 0 | 0 | 7.0 | | LEVE |
| | TM | 4 | 7 | 0 | 10.0 | | MEDIA |
| | TM | 4 | 17 | 0 | 5.0 | | PESADA |
| | TM | 4 | 22 | 0 | 2.0 | | MEDIA |

Figura 6.1 - Discretização temporal da simulação, à esquerda (bloco DISC do arquivo SIMUL.DAT) e da otimização, à direita (registros TM do arquivo ENTDAOS.XXX).

Um resumo desses dados é apresentado na Tabela 6.1. Escolheu-se um horizonte de estudo que resultasse em uma mudança de mês e ano para que se pudesse verificar a adequação das informações referentes à data nos relatórios de saída do modelo.

Tabela 6.1 - Dados resumidos do horizonte e discretização temporal.

| | Simulação | Otimização |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Instante de Início | 29/12/2009 – 00:00 | 31/12/2009 – 00:00 |
| Instante de Término | 31/12/2009 – 00:00 | 04/01/2010 – 00:00 |
| Nº períodos | 4 | 20 |
| Duração dos períodos | 12h cada | variável |

6.2. Dados de enchimento de volume morto

De forma a exemplificar os diversos modos de operação das usinas descritas na seção 3.1 para usinas a fio d'água e com reservatório, consideraram-se no caso em estudo as seguintes operações de enchimento de volume morto:

1. Usina de Emborcação (024) em construção no início do estudo, e iniciando o seu enchimento durante o horizonte de otimização, permanecendo em enchimento até o final do estudo.
2. Usina de Salto Osório (078) em construção no início do estudo, e iniciando o seu enchimento durante o horizonte de simulação, permanecendo em enchimento até o final do estudo;
3. Usina de Curua-Una (272) em enchimento ao longo de todo o horizonte de otimização e simulação;
4. Usina de Boa Esperança (190) em enchimento ao longo de toda a simulação e parte do horizonte de otimização, iniciando a sua operação hidráulica e energética durante o horizonte de otimização
5. Usina de Itutinga (002) em enchimento ao longo de parte da simulação, iniciando a sua operação hidráulica e energética durante o próprio horizonte de simulação;
6. Usina de Moxotó (173) em enchimento ao longo de parte da simulação e iniciando a sua operação hidráulica no próprio horizonte de simulação, porém com o início da operação energética apenas durante o horizonte de otimização.

Nas situações 1, 3 e 4 a usina em questão é uma usina de regularização, e nas situações 2, 5 e 6 a usina é a fio d'água.

6.2.1. Dados do arquivo ENTDADOS.XXX

A seguir, reproduzem-se os registros dos arquivos ENTDADOS.XXX que contém os dados de enchimento de volume morto. A consolidação desses dados é mostrada na Tabela 6.2.

```

& ind nome ss Vinic Evap di hi m VmorInic Tv Pdc
&X XXX XXXXXXXXXXXXX XX XXXXXXXXXXXXX XX XX X XXXXXXXXXXXXXXXX X
UH 1 CAMARGOS 1 60.0 0 I
UH 24 EMBORCACAO 1 0.0 0 I 0.0
UH 78 SALTO OSORIO 2 0.0 0 I 1000.0
UH 272 CURUA-UNA 4 42.3 0 I 10.0
UH 190 B. ESPERANCA 3 34.2 0 I 3100.0
UH 2 ITUTINGA 1 0.0 0 I 5.0
UH 173 MOXOTO 3 0.0 0 02 00 0 1220.0

```

Figura 6.2 – Volume morto inicial – registros UH do arquivo ENTDAADOS.XXX.

```

& Iusi di hi m df hf m TaxVmor (m3/s)
& XXX XX XX X XX XX X XXXXXXXXXXXXX
VM 024 29 0 F 0.0
VM 024 01 0 F 200.0
VM 078 29 0 F 0.0
VM 078 30 0 F 100.0
VM 272 29 F 40.0
VM 272 31 F 80.0
VM 190 I F 200.0
VM 002 I F 300.0
VM 173 I F 1000.0

```

Figura 6.3 – Vazão de enchimento de volume morto - registros VM do arquivo ENTDAADOS.XXX.

```

& Iusi di hi m df hf m TaxDesc (m3/s)
& XXX XX XX X XX XX X XXXXXXXXXXXXX
DF 024 29 0 F 0.0
DF 024 01 0 F 50.0
DF 078 29 0 F 0.0
DF 078 30 0 F 200.0
DF 272 I 0 F 20.0
DF 190 I F 0.0
DF 002 I F 10.0
DF 173 I F 50.0

```

Figura 6.4 -- Descarga de fundo - registros DF do arquivo ENTDAADOS.XXX.

Tabela 6.2 - Consolidação dos dados de enchimento de volume morto.

| Usina | Volume Morto inicial (hm ³) | Taxa de Enchimento (m ³ /s) | Taxa de Descarga de Fundo (m ³ /s) |
|---------------------|---|--|---|
| Emborcação (024) | 0,00 | dias 29 a 31: 0,00 dias 01 a 04: 200,00 | dias 29 a 31: 0,00 dias 01 a 04: 50,00 |
| Salto Osório (078) | 1000,00 | dia 29: 0,00 dias 30 a 04: 100,00 | dia 29: 0,00 dias 30 a 04: 200,00 |
| Curua-Una (272) | 10,00 | dias 29 a 30: 40,00 dias 31 a 04: 80,00 | 20,00 |
| Boa Esperança (190) | 3100,00 | 200,00 | 0,00 |
| Itutinga (002) | 5,00 | 300,00 | 10,00 |
| Moxotó (173) | 1220,00 | 1000,00 | 50,00 |

6.2.2. Dados do arquivo SIMUL.XXX

Para as usinas com enchimento de volume morto, o modelo realiza as seguintes modificações na leitura dos dados de entrada do arquivo SIMUL.XXX:

- ignora-se o valor de volume armazenado inicial informado no bloco VOLI. Caso este campo tenha sido preenchido, o modelo emite a seguinte mensagem de atenção para o usuário:

```
ATENCAO: Usina 024 ( EMBORCACAO ) está enchendo volume morto.  
Desconsiderado valor de volume inicial.  
Registro No: 11 - Arquivo: SIMUL.DAT
```

- não deve ser informada meta de geração para as usinas com enchimento de volume morto. Neste caso, o modelo emite a seguinte mensagem de atenção:

```
ATENCAO: Ignorada meta de geracao para a usina 78 (SALTO OSORIO)  
em processo de enchimento de volume morto (usina nao esta operando).  
Registro no. 6494 do arquivo SIMUL.DAT
```

6.3. Resolução do problema

Para verificar a correção na implementação da funcionalidade de enchimento de volume morto no modelo DESSEM-PAT, o caso foi executado utilizando-se as duas estratégias distintas de resolução existentes atualmente no modelo: o modo PL-Único e o método de Programação Dinâmica Dual (PDD), com a estratégia tradicional de um único subproblema por estágio.

Os resultados de convergência impressos no arquivo LOG_RELATO em ambas as execuções são mostrados na Figura 6.5 e Figura 6.6. O caso no modo Benders foi executado com uma tolerância de otimalidade bem reduzida ($10^{-7}\%$) para que se pudesse comparar com grande precisão os resultados fornecidos por ambos os modos de execução.

RELATORIO DE EXECUCAO DA OTIMIZACAO

Cálculo da Programação Diária da Operação
Método: PL Único

Função objetivo do Problema Linear (FOBJ): 52939384.4 (1000\$)
Custo futuro de operacao (ALFA) : 37125255.4 (1000\$)
Custo Presente (FOBJ-ALFA) : 15814129.0 (1000\$)

Figura 6.5 - Relatório de Convergência – resolução do problema por PL-Único.

RELATORIO DE EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO

Cálculo da Programação Diária da Operação
Método: Programacao Dinâmica Dual (PDD)

1a. Etapa: Cálculo da Política de Operação

| ITER | Zinf (1000\$) | Zsup (1000\$) | GAP (%) | TEMPO |
|------|--|--|--------------|----------|
| 1 | 46191752.8 | ***** | 0.2E+26 | 00:00:07 |
| 2 | 46191753.7 | 64244688.9 | 39.082593239 | 00:00:10 |
| 3 | 52692857.2 | 53254374.2 | 1.065641509 | 00:00:12 |
| 4 | 52894466.3 | 52958908.9 | 0.121832359 | 00:00:15 |
| 5 | 52929287.5 | 52958908.9 | 0.055964006 | 00:00:18 |
| 6 | 52929289.7 | 52946446.4 | 0.032414404 | 00:00:20 |
| 7 | 52932322.8 | 52946446.4 | 0.026682362 | 00:00:23 |
| 8 | 52932324.3 | 52946446.4 | 0.026679514 | 00:00:25 |
| 9 | 52932960.9 | 52943737.7 | 0.020359425 | 00:00:28 |
| 10 | 52932967.1 | 52943302.9 | 0.019526059 | 00:00:30 |
| 11 | 52938081.4 | 52941552.9 | 0.006557731 | 00:00:33 |
| 12 | 52938081.5 | 52941552.9 | 0.006557556 | 00:00:35 |
| 13 | 52938081.6 | 52941552.9 | 0.006557403 | 00:00:38 |
| 14 | 52938082.9 | 52941552.9 | 0.006554990 | 00:00:40 |
| 15 | 52938083.2 | 52940733.8 | 0.005007071 | 00:00:43 |
| 16 | 52938107.4 | 52940733.8 | 0.004961253 | 00:00:45 |
| 17 | 52938128.0 | 52940733.8 | 0.004922448 | 00:00:48 |
| 18 | 52938128.6 | 52940584.9 | 0.004639872 | 00:00:50 |
| 19 | 52938504.2 | 52939947.9 | 0.002727024 | 00:00:53 |
| 20 | 52938504.4 | 52939947.9 | 0.002726770 | 00:00:55 |
| 21 | 52938504.9 | 52939947.9 | 0.002725744 | 00:00:58 |
| 22 | 52938519.6 | 52939947.9 | 0.002698001 | 00:01:00 |
| 23 | 52938519.6 | 52939947.1 | 0.002696535 | 00:01:03 |
| 360 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000162 | 00:16:56 |
| 361 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000158 | 00:16:59 |
| 362 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000154 | 00:17:02 |
| 363 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000150 | 00:17:06 |
| 364 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000128 | 00:17:09 |
| 365 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000126 | 00:17:12 |
| 366 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000126 | 00:17:15 |
| 367 | 52939384.4 | 52939384.5 | 0.000000125 | 00:17:19 |
| 368 | 52939384.4 | 52939384.4 | 0.000000085 | 00:17:22 |

RESOLUCAO DO PROBLEMA FINALIZADA COM SUCESSO

Figura 6.6 - Relatório de Convergência – resolução do problema por PDD.

Conforme esperado, os custos totais de operação obtidos nos dois modos foram iguais, para a precisão de uma casa decimal.¹

6.4. Relatórios de enchimento de volume morto

Nesta seção mostram-se alguns dos relatórios emitidos pelo modelo com os resultados da operação das usinas com enchimento de volume morto.

6.4.1. Relatório com os dados de enchimento de volume morto (ECO_VMOR.XXX)

Este arquivo lista os dados referentes ao enchimento de volume morto fornecidos pelo usuário ou constantes do cadastro de usinas hidroelétricas. É composto por duas seções:

Dados de volume morto inicial das usinas

Nesta tabela, reproduzida na Figura 6.7, mostram-se os valores de volume morto inicial fornecidos nos registros UH, e o volume morto máximo, que corresponde ao volume mínimo da usina:

```

-----
Relatório de dados de enchimento de volume morto:
-----

Volume Morto Inicial:
-----;-----;-----;-----;
USIH ; Nome ; Vmorto Inic ; Vmin ;
; ; (hm3) ; (%) ; (hm3) ;
-----;-----;-----;-----;
 24 ; EMBORCACAO ; 0.00 ; 0.00 ; 4669.00 ;
 78 ; SALTO OSORIO ; 1000.00 ; 88.97 ; 1124.00 ;
272 ; CURUA-UNA ; 10.00 ; 7.69 ; 130.00 ;
190 ; B. ESPERANCA ; 3100.00 ; 97.70 ; 3173.00 ;
 2 ; ITUTINGA ; 5.00 ; 45.45 ; 11.00 ;
173 ; MOXOTO ; 1220.00 ; 99.51 ; 1226.00 ;
-----;-----;-----;-----;

```

Figura 6.7 - Primeira parte do arquivo de ECO dos dados para enchimento de volume morto.

Na segunda parte do arquivo, mostram-se os valores de vazão de enchimento e descarga de fundo fornecidos nos registros VM e DF, respectivamente, já processados para cada meia-hora do horizonte de simulação e otimização. A Figura 6.8 mostra um trecho desse arquivo.

¹ Para possibilitar essa comparação, o caso foi executado sem consideração da soleira de vertedouro e da vazão no canal Pereira Barreto.

 Qench: Vazão líquida de enchimento (Reg. VM)
 Qdesc: Vazão para descarga de fundo (Reg. DF)

| DATA | HORA | USIH | Nome | Qench (m3/s) | Qdesc (m3/s) |
|------------|-------|------|--------------|-----------------|-----------------|
| 29/12/2007 | 00:00 | 24 | EMBORCACAO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 00:00 | 78 | SALTO OSORIO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 00:00 | 272 | CURUA-UNA | 40.00 | 20.00 |
| 29/12/2007 | 00:00 | 190 | B. ESPERANCA | 200.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 00:00 | 2 | ITUTINGA | 300.00 | 10.00 |
| 29/12/2007 | 00:00 | 173 | MOXOTO | 1000.00 | 50.00 |
| 29/12/2007 | 00:30 | 24 | EMBORCACAO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 00:30 | 78 | SALTO OSORIO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 00:30 | 272 | CURUA-UNA | 40.00 | 20.00 |
| 29/12/2007 | 00:30 | 190 | B. ESPERANCA | 200.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 00:30 | 2 | ITUTINGA | 300.00 | 10.00 |
| 29/12/2007 | 00:30 | 173 | MOXOTO | 1000.00 | 50.00 |
| 29/12/2007 | 01:00 | 24 | EMBORCACAO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 01:00 | 78 | SALTO OSORIO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 01:00 | 272 | CURUA-UNA | 40.00 | 20.00 |
| 29/12/2007 | 01:00 | 190 | B. ESPERANCA | 200.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 01:00 | 2 | ITUTINGA | 300.00 | 10.00 |
| 29/12/2007 | 01:00 | 173 | MOXOTO | 1000.00 | 50.00 |
| 29/12/2007 | 01:30 | 24 | EMBORCACAO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 01:30 | 78 | SALTO OSORIO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 01:30 | 272 | CURUA-UNA | 40.00 | 20.00 |
| 29/12/2007 | 01:30 | 190 | B. ESPERANCA | 200.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 01:30 | 2 | ITUTINGA | 300.00 | 10.00 |
| 29/12/2007 | 01:30 | 173 | MOXOTO | 1000.00 | 50.00 |
| 29/12/2007 | 02:00 | 24 | EMBORCACAO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 02:00 | 78 | SALTO OSORIO | 0.00 | 0.00 |
| 29/12/2007 | 02:00 | 272 | CURUA-UNA | 40.00 | 20.00 |
| 29/12/2007 | 02:00 | 190 | B. ESPERANCA | 200.00 | 0.00 |

Figura 6.8 - Trecho da segunda parte do arquivo de ECO dos dados para enchimento de volume morto.

6.4.2. Relatório de enchimento de volume morto (SIM_VMOR.XXX / PDO_VMOR.XXX)

Estes relatórios detalham exclusivamente o balanço hídrico e a evolução do armazenamento das usinas com enchimento de volume morto. Os relatórios no horizonte de simulação e otimização são mostrados na Figura 6.10 e Figura 6.11, respectivamente.

Estas tabelas contêm todas as informações necessárias para se verificar o atendimento às equações de balanço hídrico das usinas enchendo volume morto. A descrição de cada coluna é mostrada na Figura 6.9, que reproduz o cabeçalho das tabelas desses arquivos.

```

-----
ind: Índice do período
Dur: Duração do período
Qinc: Vazão incremental natural
Qafl: Vazão total afluyente vinda de usinas de montante
Qench: Vazão líquida de enchimento (Reg. VM)
Qevap: Vazão evaporada
Qret: Vazão retirada (Reg. DA)
Qdesc: Vazão para descarga de fundo (Reg. DF)
Qdefl: Vazão defluente adicional à descarga de fundo (vertimento + desvio)
Qtur: Vazão turbinada (se usina iniciar a operação energética no período)
Qarm: Vazão armazenada (se usina iniciar a operação energética no período)
-----

```

Figura 6.9 - Cabeçalhos dos arquivos de relatório de enchimento de volume morto, contendo a descrição das colunas da tabela

Nestes relatórios, o valor de “Qdefl” corresponde à defluência adicional à descarga de fundo, descrita na seção 2.3.

| IPER | dur | USIH | Nome | Qinc | Qafl | Qench | Qevap | Qret | Qdesc | Qdefl | Qtur | Volume Morto | | | | |
|------|------|------|--------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------------|-------|---------|--------|-------|
| | | | | | | | | | | | | Inicial | % | Final | % | |
| (h) | | | | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3) | (%) | (m3) | (%) | |
| 1 | 12.0 | 24 | EMBORCACAO | 321.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 320.00 | - | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 1 | 12.0 | 78 | SALTO OSORIO | 34.00 | 1265.28 | 0.00 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 1294.28 | - | 1000.00 | 88.97 | 1000.00 | 88.97 | |
| 1 | 12.0 | 272 | CURUA-UNA | 117.00 | 0.00 | 40.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 57.00 | - | 10.00 | 7.69 | 11.73 | 9.02 |
| 1 | 12.0 | 190 | B. ESPERANCA | 336.00 | 0.00 | 200.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 136.00 | - | 3100.00 | 97.70 | 3108.64 | 97.97 | |
| 1 | 12.0 | 2 | ITUTINGA | 27.00 | 166.44 | 138.89 | 0.00 | 0.00 | 4.63 | 0.00 | 49.92 | 5.00 | 45.45 | 11.00 | 100.00 | |
| 1 | 12.0 | 173 | MOXOTO | 0.00 | 2152.27 | 138.89 | 0.00 | 0.00 | 6.94 | 2006.43 | 0.00 | 1220.00 | 99.51 | 1226.00 | 100.00 | |
| 2 | 12.0 | 24 | EMBORCACAO | 321.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 320.00 | - | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 2 | 12.0 | 78 | SALTO OSORIO | 34.00 | 1441.42 | 0.00 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 1470.42 | - | 1000.00 | 88.97 | 1000.00 | 88.97 | |
| 2 | 12.0 | 272 | CURUA-UNA | 117.00 | 0.00 | 40.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 57.00 | - | 11.73 | 9.02 | 13.46 | 10.35 |
| 2 | 12.0 | 190 | B. ESPERANCA | 336.00 | 0.00 | 200.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 136.00 | - | 3108.64 | 97.97 | 3117.28 | 98.24 | |
| 3 | 12.0 | 24 | EMBORCACAO | 367.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 366.00 | - | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 3 | 12.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 1038.49 | 100.00 | 0.00 | 5.00 | 200.00 | 777.49 | - | 1000.00 | 88.97 | 1004.32 | 89.35 | |
| 3 | 12.0 | 272 | CURUA-UNA | 142.00 | 0.00 | 40.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 82.00 | - | 13.46 | 10.35 | 15.18 | 11.68 |
| 3 | 12.0 | 190 | B. ESPERANCA | 324.00 | 0.00 | 200.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 124.00 | - | 3117.28 | 98.24 | 3125.92 | 98.52 | |
| 4 | 12.0 | 24 | EMBORCACAO | 367.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 366.00 | - | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 4 | 12.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 1194.37 | 100.00 | 0.00 | 5.00 | 200.00 | 933.37 | - | 1004.32 | 89.35 | 1008.64 | 89.74 | |
| 4 | 12.0 | 272 | CURUA-UNA | 142.00 | 0.00 | 40.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 82.00 | - | 15.18 | 11.68 | 16.91 | 13.01 |
| 4 | 12.0 | 190 | B. ESPERANCA | 324.00 | 0.00 | 200.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 124.00 | - | 3125.92 | 98.52 | 3134.56 | 98.79 | |

Figura 6.10 - Relatório de enchimento de volume morto durante a simulação (SIM_VMOR.XXX)

| | | | | | | | | | | | | | | Volume Morto | | | |
|------|------|------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------------|--|--|--|
| IPER | dur | USIH | Nome | Qinc | Qaf1 | Qench | Qevap | Qret | Qdesc | Qdefil | Qtur | Qarm | Inicial | Final | | | |
| : | (h) | : | : | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (m3/s) | (hm3) | (%) | | | |
| : | : | : | : | : | : | : | : | : | : | : | : | : | (hm3) | (%) | | | |
| 1 | 7.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 0.00 | 576.20 | - | - | 0.00 | 0.00 | | | |
| 1 | 7.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1008.64 | 89.74 | | | |
| 1 | 7.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 16.91 | 13.01 | | | |
| 1 | 7.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3134.56 | 98.79 | | | |
| 2 | 10.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 0.00 | 576.20 | - | - | 0.00 | 0.00 | | | |
| 2 | 10.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1011.16 | 89.96 | | | |
| 2 | 10.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 18.93 | 14.56 | | | |
| 2 | 10.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3139.60 | 98.95 | | | |
| 3 | 5.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 0.00 | 576.20 | - | - | 0.00 | 0.00 | | | |
| 3 | 5.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1014.76 | 90.28 | | | |
| 3 | 5.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 21.81 | 16.78 | | | |
| 3 | 5.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3146.80 | 99.17 | | | |
| 4 | 2.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 0.00 | 576.20 | - | - | 0.00 | 0.00 | | | |
| 4 | 2.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1016.56 | 90.44 | | | |
| 4 | 2.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 23.25 | 17.88 | | | |
| 4 | 2.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3150.40 | 99.29 | | | |
| 5 | 7.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 0.00 | 0.00 | | | |
| 5 | 7.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1017.28 | 90.51 | | | |
| 5 | 7.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 23.82 | 18.33 | | | |
| 5 | 7.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3151.84 | 99.33 | | | |
| 6 | 10.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 5.04 | 0.11 | | | |
| 6 | 10.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1019.80 | 90.73 | | | |
| 6 | 10.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 25.84 | 19.88 | | | |
| 6 | 10.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3156.88 | 99.49 | | | |
| 7 | 5.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 12.24 | 0.26 | | | |
| 7 | 5.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1023.40 | 91.05 | | | |
| 7 | 5.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 28.72 | 22.09 | | | |
| 7 | 5.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3164.08 | 99.72 | | | |
| 8 | 2.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 15.84 | 0.34 | | | |
| 8 | 2.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1025.20 | 91.21 | | | |
| 8 | 2.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 28.72 | 22.09 | | | |
| 8 | 2.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 200.00 | - | 0.00 | 0.00 | 221.00 | - | - | 3167.68 | 99.83 | | | |
| 9 | 7.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 17.28 | 0.37 | | | |
| 9 | 7.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1025.92 | 91.27 | | | |
| 9 | 7.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 30.74 | 23.64 | | | |
| 9 | 7.0 | 190 | B. ESPERANCA | 421.00 | 0.00 | 153.97 | - | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 267.03 | 3169.12 | 99.88 | | | |
| 10 | 10.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 22.32 | 0.48 | | | |
| 10 | 10.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1028.44 | 91.50 | | | |
| 10 | 10.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 32.75 | 25.19 | | | |
| 11 | 5.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 29.52 | 0.63 | | | |
| 11 | 5.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1032.04 | 91.82 | | | |
| 11 | 5.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 35.56 | 27.35 | | | |
| 12 | 2.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 33.12 | 0.71 | | | |
| 12 | 2.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1033.84 | 91.98 | | | |
| 12 | 2.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 37.00 | 28.46 | | | |
| 13 | 7.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 34.56 | 0.74 | | | |
| 13 | 7.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1034.56 | 92.04 | | | |
| 13 | 7.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 37.59 | 28.90 | | | |
| 14 | 10.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 39.60 | 0.85 | | | |
| 14 | 10.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1037.08 | 92.27 | | | |
| 14 | 10.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 39.59 | 30.46 | | | |
| 15 | 5.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 46.80 | 1.00 | | | |
| 15 | 5.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1040.68 | 92.59 | | | |
| 15 | 5.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 42.47 | 32.67 | | | |
| 16 | 2.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 50.40 | 1.08 | | | |
| 16 | 2.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1042.48 | 92.75 | | | |
| 16 | 2.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 43.91 | 33.78 | | | |
| 17 | 7.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 51.84 | 1.11 | | | |
| 17 | 7.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1043.20 | 92.81 | | | |
| 17 | 7.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 44.49 | 34.22 | | | |
| 18 | 10.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 56.88 | 1.22 | | | |
| 18 | 10.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1045.72 | 93.04 | | | |
| 18 | 10.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 46.50 | 35.77 | | | |
| 19 | 5.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 64.08 | 1.37 | | | |
| 19 | 5.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1049.32 | 93.36 | | | |
| 19 | 5.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 49.38 | 37.99 | | | |
| 20 | 2.0 | 24 | EMBORCACAO | 577.00 | 0.00 | 0.00 | - | 0.80 | 50.00 | 326.20 | - | - | 67.68 | 1.45 | | | |
| 20 | 2.0 | 78 | SALTO OSORIO | 44.00 | 446.10 | 100.00 | - | 0.10 | 200.00 | 190.00 | - | - | 1051.12 | 93.52 | | | |
| 20 | 2.0 | 272 | CURUA-UNA | 127.00 | 0.00 | 80.00 | - | 0.00 | 20.00 | 27.00 | - | - | 50.82 | 39.10 | | | |

Figura 6.11 - Relatório de enchimento de volume morto durante a otimização (PDO_VMOR.XXX)

Observa-se que, quando uma usina completa o seu enchimento durante o horizonte de simulação ou otimização, esses relatórios só mostram o balanço hídrico das usinas até o período em que se completa o enchimento, como são os casos de Itutinga (até o período 1 da simulação) e Boa Esperança (até o período 8 da otimização). Para os períodos seguintes, devem-se consultar os relatórios de balanço hídrico das usinas hidroelétricas, descritos na seção 6.4.3 a seguir.

6.4.3. Relatório de balanço hídrico (PDO_OPERACAO, SIM_OPERACAO)

As usinas com enchimento de volume morto aparecem normalmente nos relatórios de balanço hídrico da simulação e otimização nos arquivos SIM_OPERACAO e PDO_OPERACAO, respectivamente. Nestes relatórios, estas usinas são indicadas para os períodos de enchimento

de volume morto como tendo um volume útil igual à zero. Os resultados de enchimento não são impressos, sendo informadas apenas as defluências para a usina de jusante, da seguinte forma: a descarga de fundo é impressa em uma coluna à parte, e a defluência adicional é impressa na mesma coluna de vertimento / desvio das demais usinas.

6.4.4. Inviabilidades na operação de enchimento (LOG_INVIAB.XXX)

A operação de enchimento de uma usina não traduz em um custo direto (real) para a operação do sistema. Entretanto, caso não seja possível atender a essas restrições, o modelo incorrerá em custos associados às violações dessas restrições.

Na modelagem apresentada nesse relatório, as vazões associadas ao enchimento são abatidas “por fora” do RHS das restrições de balanço hídrico, mas incluem-se variáveis de folga f_{VM} nas equações de balanço hídrico (vide seção 2.3), as quais permitem o “retorno” do volume de água perdido em função do enchimento caso não seja possível atendê-lo. O custo de violação de enchimento é da mesma ordem que a penalidade das equações de balanço hídrico e da função de produção das usinas hidroelétricas, as quais são restrições físicas do sistema.

Portanto, sempre que uma restrição operativa hidráulica (no arquivo OPERUH, por exemplo) conflitar com os requisitos para operação de enchimento das usinas, o modelo irá violar inicialmente a restrição operativa, privilegiando o atendimento ao enchimento. Desta forma, a variável de folga para enchimento só estará ativa caso esta restrição esteja em conflito com a própria equação de balanço hídrico da usina hidroelétrica.¹

Quando os requisitos de enchimento não são atendidos, o modelo procede da seguinte forma:

- ao resolver o PL, a variável de folga para enchimento é “ativada”, ou seja, assume um valor diferente de zero;
- as restrições que foram violadas são listadas no arquivo SIM_INVIAB.XXX (violações na simulação) e LOG_INVIAB.XXX (violações na otimização);
- os custos associados ao não atendimento dessas restrições são informados nos arquivos SIM_OPERACAO.XXX e PDO_OPERACAO.XXX.

¹ Por exemplo, quando se impõe uma vazão de enchimento superior à vazão incremental natural para uma usina de cabeceira, a qual não pode ser “ajudada” por defluências de usinas de montante.

Para ilustrar essa situação, realizou-se uma variante do caso apresentado anteriormente, onde se incluiu a seguinte restrição de enchimento para a usina de Boa Esperança:

```

& usih di hi m df hf m TaxEnch (m3/s)
& XXX XX XX X XX XX X xxxxxxxxxxxx
VM 190 I      F      1000.0
    
```

e se alterou o valor de volume morto inicial para 0,0 hm³, de forma que, com essa taxa de 1000m³/s, não fosse possível completar o volume morto da usina até o final do horizonte de otimização.

Como a usina de Boa Esperança é de cabeceira e sua vazão incremental varia entre 324 m³/s (horizonte de simulação) e 421 m³/s (horizonte de otimização), não é possível atender a essa taxa de enchimento. Ao se executar o modelo com essa restrição, obtiveram-se as seguintes mensagens de violação no arquivo LOG_INVIAB.XXX:

```

-----;-----;-----;-----;
IPER ;          RESTRICA0          ; Violacao          ; Unidade ;
-----;-----;-----;-----;
 1 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
1 ; FVMOR 190 001          ; 579.00000          ; m3/s ;
1 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
1 ; INF_LIM_OPE_00235          ; 2.00000          ; m3/s ;
1 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
1 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
2 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
2 ; FVMOR 190 002          ; 579.00000          ; m3/s ;
2 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
2 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
2 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
3 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
3 ; FVMOR 190 003          ; 579.00000          ; m3/s ;
3 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
3 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
3 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
4 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
4 ; FVMOR 190 004          ; 579.00000          ; m3/s ;
4 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
4 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
4 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
5 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
5 ; FVMOR 190 005          ; 579.00000          ; m3/s ;
5 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
5 ; INF_LIM_OPE_00235          ; 2.00000          ; m3/s ;
5 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
5 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
6 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
6 ; FVMOR 190 006          ; 579.00000          ; m3/s ;
6 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
6 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
6 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
7 ; USOS ALTERN 118-BILLINGS          ; 7.80000          ; m3/s ;
7 ; FVMOR 190 007          ; 579.00000          ; m3/s ;
7 ; INF_LIM_OPE_00075          ; 8.00000          ; m3/s ;
7 ; INF_LIM_OPE_00240          ; 190.00001          ; m3/s ;
7 ; INF_LIM_OPE_00252          ; 240.00001          ; m3/s ;
          .
    
```

Figura 6.12 .- Relatório de inviabilidades no atendimento ao enchimento de volume morto.

Percebe-se que a violação correspondeu exatamente à diferença entre a vazão incremental da usina e a taxa requerida para o enchimento (a taxa de descarga de fundo foi nula). O custo associado a essas violações está embutido no custo total de violações de restrições, impresso ao final de cada dia e semana do estudo no arquivo PDO_SUMAOPER, conforme ilustra a Figura 6.13.

```

9 - CUSTOS NA SEMANA (1.000.000$):

CUSTO DE OPERACAO           :          52.012015
CUSTO DE VIOLACOES DE RESTRICOES : 14974.610511
CUSTO DE PENALIDADES        :           0.028680
CUSTO TOTAL DA OTIMIZACAO    : 15026.651206
    
```

Figura 6.13 - Impressão do custo total de violações no arquivo PDO_SUMAOPER.

O “custo de penalidades” mostrado acima se refere ao custo associados às penalizações (muito pequenas) aplicadas no PL para algumas variáveis do problema, como o vertimento.

6.5. Tempo Computacional

Em princípio, não se espera que a consideração do enchimento de volume morto leve a um acréscimo ou decréscimo significativo no tempo computacional para se resolver o problema, tanto na simulação como na otimização.

Para ilustrar esse fato, mostram na Tabela 6.3 os tempos computacionais para se resolver o problema nos modos Benders e PL-Único, com a mesma configuração e conjunto de restrições operativas, sendo a única diferença entre os casos a consideração ou não das restrições de enchimento de volume morto.

Tabela 6.3 - Tempos computacionais para resolução do problema (Simulação + Otimização), considerando-se ou não o enchimento de volume morto,

| Tempo computacional (hr:min:seg) | PL-Único | Benders (10 ⁻³ %) | Benders (10 ⁻⁵ %) | Benders (10 ⁻⁷ %) |
|----------------------------------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Sem enchimento de volume morto | 0:00:31 | 0:00:50 | 0:03:32 | 0:09:15 |
| Com enchimento de volume morto | 0:00:30 | 0:00:55 | 0:04:03 | 0:09:10 |

Percebe-se que, para um mesmo modo de execução (PL-Único ou Benders), o tempo computacional variou muito pouco nas opções com ou sem enchimento. Houve apenas uma diferença um pouco maior a favor do caso sem enchimento para um *gap* de 10⁻⁵%, no entanto

esse mesmo caso levou mais tempo para ser resolvido quando se utilizou uma tolerância de $10^{-7}\%$. Apesar de um único caso não ser suficiente para concluirmos se há ou não uma tendência de elevação / redução do tempo computacional, não há indícios teóricos para se crer que a presença de usinas enchendo volume morto no estudo possa provocar uma maior dificuldade de convergência do algoritmo.

Deve-se ressaltar ainda a grande vantagem do modo PL-Único em relação ao modo Benders, uma vez que a solução obtida pelo PL-Único equivale a uma precisão de $10^{-8}\%$ no valor da solução ótima, pois este é o parâmetro de otimalidade utilizado pelo pacote para resolver os programas lineares. **Recomenda-se, portanto, executar o modelo DESSEM-PAT preferencialmente na opção PL-Único, exceto em casos onde o volume de restrições operativas seja impeditivo para tal, como por exemplo quando se consideram as perdas na rede elétrica.** Nestas situações, deve-se utilizar o modo Benders, mas o número de estágios (que é informado pelo usuário nos registros AG) deve ser tanto menor quanto possível.

7. CONCLUSÕES

Este relatório teve por objetivo descrever a funcionalidade de enchimento de volume morto para as usinas hidroelétricas, implementada em Abril/2010 nos modelos do projeto DESSEM.

Como principais conclusões desse estudo, podemos citar:

- a modelagem considerada é comum para todos os modelos do projeto DESSEM, seja o de simulação hidráulica (SIMHIDR), de programação diária da operação (DESSEM-PAT) ou de pré-despacho da operação considerando restrições de *unit commitment* (DESSEM-UC);
- o uso dessa funcionalidade é bastante flexível, pois permite representar usinas que estejam em fase de construção, em fase de enchimento de volume morto, ou que já estejam em operação hidráulica porém aguardando o término do comissionamento de suas primeiras unidades geradoras;
- a modelagem concebida para o enchimento de volume morto permite a resolução do problema por um algoritmo de programação linear, seja de forma direta (PL-Único) ou utilizando decomposição de Benders;
- A funcionalidade de enchimento de volume morto não onera o modelo em termos de tempo computacional para resolução do problema, seja na simulação ou otimização.

8. REFERÊNCIAS

- [1] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual do Usuário – Modelo DESSEM-PAT, versão 6.0”, Relatório Técnico CEPEL, Abril / 2010.
- [2] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Uma estratégia de decomposição por relaxação Lagrangeana para a otimização da programação diária da operação de sistemas hidrotérmicos com modelagem detalhada da rede elétrica – aplicação ao sistema Brasileiro”, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA – 9128/07, Julho 2007.
- [3] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Programa SIMHIDR - Simulação da Operação Hidroelétrica de Usinas Hidroelétricas em Cascata – Manual do Usuário, versão 1.0”, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA – 14079/07, Abril 2007.
- [4] .CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Consideração da Evaporação nos Reservatórios nos Modelos SIMHIDR E DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Abril 2010.