

# Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

## Relatório Técnico



<b>Nº/Ano:</b> 1004/2011	<b>Nº de Páginas:</b> 34	<b>Nº de Anexos:</b>
--------------------------	--------------------------	----------------------

**Título:** MODELAGEM DO VERTIMENTO E DESVIO DAS USINAS HIDROELÉTRICAS NOS MODELOS SIMHIDR E DESSEM-PAT.

**Departamento:** Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

**Área de Responsabilidade:** B200      **Conta de Apropriação:** 1399

<b>Cliente:</b> Centrais Elétricas Brasileiras S/A – ELETROBRAS Av. Presidente Vargas, 409 – 12º andar 20071-003 – Rio de Janeiro / RJ	<b>Equipe de Acompanhamento:</b> Luis Ernesto Areias – ELETROBRAS Renata Leite Falcão – ELETROBRAS
<b>Atenção:</b> Egidio Schoenberger	

**Resumo:**  
Este Relatório Técnico descreve a modelagem do vertimento e desvio das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, em particular os módulos SIMHIDR e DESSEM-PAT. Descreve-se a modelagem das restrições de cota de soleira, restrições "hard" de limite e de variação para essas variáveis, e o uso de penalidades para controlar o "bang-bang" de vertimento em períodos de tempo consecutivos. Os resultados de um estudo de caso com o sistema brasileiro mostram que as penalidades adotadas são eficientes para controlar o bang-bang de vertimento, e que as restrições "hard" de limite e de variação também melhoram o comportamento dessas variáveis, com um acréscimo pequeno no custo de operação do sistema.

**Autores:**  
André Luiz Diniz Souto Lima – CEPEL  
Tiago Norbiato dos Santos – PUC-RJ

**Palavras-Chave:**  
Programação diária da operação, simulação hidráulica, programação linear, operação de vertedouros.

**Classificação:** Controlado

**Gerente de Projeto**

**Nome:** André Luiz Diniz Souto Lima  
**Tel.:** (21)2598-6046      **Fax:** (21)2598-6482  
**E-mail:** [diniz@cepel.br](mailto:diniz@cepel.br)

**Chefe do Departamento**

**Nome:** Maria Elvira Piñeiro Maceira  
**Tel.:** (21)2598-6454      **Fax:** (21)2598-6482  
**E-mail:** [elvira@cepel.br](mailto:elvira@cepel.br)

**Aprovação**

**Roberto Pereira Caldas**  
**Diretor de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação**

25/01/11

**CEPEL**

**Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

**Projeto DESSEM**

**Relatório Técnico:**

**MODELAGEM DO VERTIMENTO E DESVIO DAS  
USINAS HIDROELÉTRICAS NOS MODELOS  
SIMHIDR E DESSEM-PAT**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2. CONCEITUAÇÃO DO VERTIMENTO E DESVIO .....</b>	<b>7</b>
2.1. Representação do reservatório da usina.....	8
2.2. Soleira para vertimento e desvio.....	9
2.3. Restrições operativas do Vertedouro .....	10
<b>3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DO VERTIMENTO / DESVIO .....</b>	<b>11</b>
3.1. Proibição ou não do vertimento em função da cota da soleira .....	11
3.2. Limite da variável vertimento em função da cota da soleira .....	12
3.3. Restrições operativas de limite de vertimento .....	13
3.4. Restrições de variação máxima de vertimento .....	13
3.4.1. Restrições “hard” de variação de vertimento .....	14
3.4.2. Restrições “soft” de variação de vertimento (RIVAR).....	14
3.5. Penalidades para as variáveis de vertimento / desvio.....	15
<b>4. DADOS PARA A MODELAGEM DO VERTIMENTO .....</b>	<b>17</b>
4.1. Dados dos reservatórios .....	17
4.2. Restrições operativas de limite de vertimento .....	17
4.3. Restrições operativas “hard” de variação de vertimento .....	17
4.4. Restrições “soft” de variação de vertimento.....	18
4.5. Validação e Processamento dos Dados.....	19
<b>5. RELATÓRIOS DE SAÍDA.....</b>	<b>20</b>
<b>6. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>21</b>
6.1. Dados gerais do estudo .....	21
6.2. Dados para a modelagem de vertimento.....	21
6.2.1. Restrições “soft” de vertimento .....	22
6.2.2. Restrições de limite de vertimento.....	22
6.2.3. Restrições operativas (“hard”) de variação de vertimento.....	22
6.3. Resultados de convergência.....	23
6.4. Relatórios de operação de vertedouro e desvio .....	24
6.5. Relatórios das restrições internas (“soft”) de variação .....	25
6.6. Análise de sensibilidade do modelo .....	26
6.6.1. Sensibilidade em relação às restrições “hard” de limite de vertimento e de variação de vertimento (arquivo OPERUH).....	26
6.6.2. Sensibilidade de variações de vertimento com o valor da penalidade <i>soft</i> ...	28
6.7. Tempo Computacional.....	31
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>33</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>34</b>

### **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.

---

**Notação:**

- $GH_i^t$  : 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  $t$ ;
- $Q_{def\ adic_i}^t$  :  $S_i^t$  : Vertimento 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 modelagem do vertimento e desvio das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, de acordo com a seguinte estrutura: no capítulo 2, faz-se uma descrição conceitual dessas variáveis em um problema de operação de sistemas hidrotérmicos; no capítulo 3, representa-se a formulação matemática dos aspectos principais relacionados ao vertimento / desvio nesses tipos de problemas, tais como: a modelagem da cota de soleira e as restrições de limite e de variação para a vazão vertida / desviada. No capítulo 4, descrevem-se os dados de entrada, e no capítulo 5 os arquivos de saída associadas às funcionalidades descritas neste relatório. No capítulo 6, apresenta-se um estudo de caso ilustrativo de

---

aplicação dessas funcionalidades com o sistema real brasileiro e no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões desse estudo.

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.

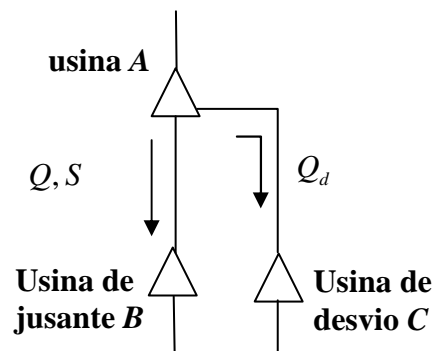
## 2. CONCEITUAÇÃO DO VERTIMENTO E DESVIO

Uma usina hidroelétrica pode defluir água de três formas:

- através de turbinamento ( $Q$ ), gerando energia elétrica e defluindo água pela turbina para a usina de jusante;
- através de vertimento ( $S$ ), sem gerar energia elétrica e defluindo água pelo vertedouro para a usina de jusante;
- através de desvio de água ( $Q_d$ ), sem gerar energia elétrica e defluindo água pelo canal de desvio para a usina de jusante para desvio.

As informações sobre as usinas de jusante e de desvio de cada usina constam do cadastro de usinas hidroelétricas. Ressalta-se que a grande maioria das usinas não apresenta desvio de água.

A Figura 2.1 ilustra as três variáveis descritas acima, para uma usina  $A$  que apresenta tanto uma usina de jusante  $B$  como uma usina de desvio  $C$ .



**Figura 2.1 - Representação em planta do vertimento e desvio em uma usina hidroelétrica em uma cascata**

O turbinamento pode ocorrer sempre que a usina tiver disponibilidade de geração, e seu valor está limitado ao engolimento máximo da turbina ou o turbinamento referente à potência máxima do gerador. O vertimento e desvio podem ocorrer sempre que a cota do reservatório da usina estiver acima das respectivas cotas das soleiras de vertimento e desvio, como será explicado posteriormente.



## 2.1. Representação do reservatório da usina

As seguintes variáveis estão associadas ao volume de água armazenado (ou simplesmente “armazenamento”) de um reservatório:

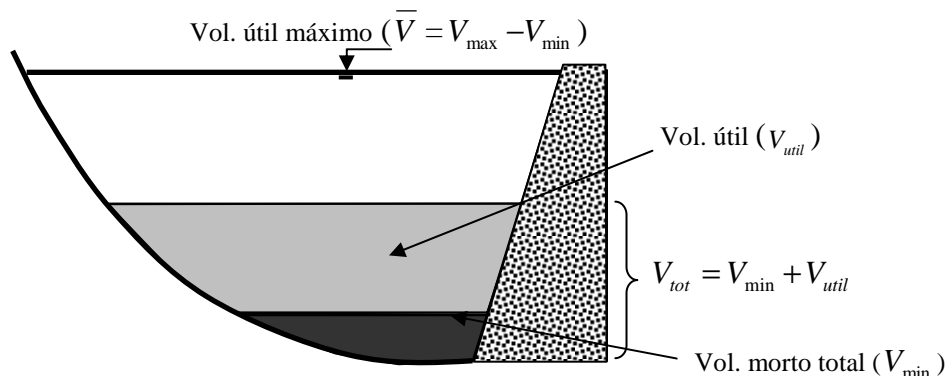
- **Volume total** ( $V_{\max}$ ): é o volume máximo armazenável no reservatório, incluindo o volume morto;
- **Volume mínimo** ( $V_{\min}$ ): corresponde ao volume morto total da usina, ou seja, é o volume mínimo operativo do reservatório da usina;
- **Volume armazenado total** ( $V_{tot}$ ): corresponde ao volume em que se encontra o reservatório da usina em determinado instante;
- **Volume útil**: uma vez em operação, a usina sempre irá operar com um armazenamento superior ao volume mínimo. Portanto, nos modelos de planejamento e operação, é conveniente definir o volume útil da usina ( $V_{util}$ ) como a diferença entre o volume armazenado total e o volume mínimo operativo:

$$V_{util} = V_{tot} - V_{\min} , \quad (2.1)$$

O qual muitas vezes é medido pelo percentual de armazenamento em relação ao volume armazenável útil total

$$V_{util} (\%) = \frac{V_{util} (hm^3)}{(V_{\max} - V_{\min})} \times 100 , \quad (2.2)$$

A Figura 2.2 ilustra a relação entre todas as variáveis associadas ao armazenamento dos reservatórios.

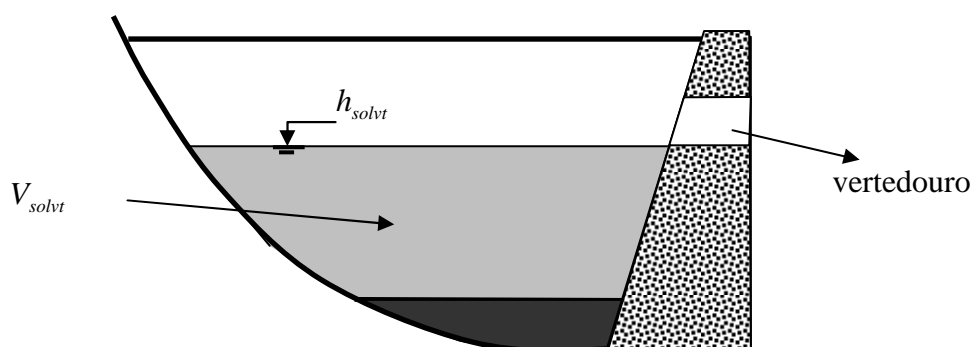


**Figura 2.2 -Relação entre as variáveis que representam o volume armazenado nos reservatórios.**

Neste documento, será considerado sempre o volume armazenado útil da usina, que será denotado simplesmente por  $V$ . Uma descrição detalhada dos reservatórios das usinas hidroelétricas e dos estados operativos de uma usina hidroelétrica, incluindo sua operação de enchimento, é feita em [4].

## 2.2. Soleira para vertimento e desvio

Como mencionado anteriormente, um reservatório só pode verter quando a cota de seu volume armazenado ultrapassa a cota referente à soleira do vertedouro  $h_{\text{solvt}}$ . O volume armazenado correspondente a essa cota é denominado de  $V_{\text{solvt}}$ , ilustrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Representação esquemática da cota de soleira de vertedouro.**

Para uma usina a fio d'água, que não possui capacidade de regularização, em todo instante tem-se  $V_{\text{tot}} = V_{\min} = V_{\max}$  e, portanto,  $V = 0$ . Para tais usinas, é **sempre possível verter**. Por

outro lado, para as usinas com reservatório de regularização, o vertimento só pode ocorrer quando  $V > V_{solvt}$ , e o quantidade máxima de água que pode ser vertida depende da diferença entre esses valores. Estas questões serão discutidas nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente.

Para a vazão desviada, ocorre exatamente o mesmo tipo de situação, só que em relação ao volume referente à soleira de desvio  $V_{solds}$ . Este volume corresponde ao armazenamento mínimo no reservatório para que possa haver desvio de água, o qual que está associado à cota mínima do canal de desvio. Portanto, uma usina com reservatório de regularização e desvio de água só pode apresentar desvio quando  $V > V_{solds}$ .

### 2.3. Restrições operativas do Vertedouro

Além das restrições físicas para vertimento e desvio descritas na seção anterior, há restrições operativas adicionais para os vertedouros e canais de desvio:

- vazão máxima de vertimento, que está associado à capacidade de vertimento do vertedouro;
- vazão máxima de desvio, que está associado à vazão máxima do canal de desvio;
- limites máximos de variação horária na vazão vertida, os quais estão associados a restrições físicas nas operações de manobra de abertura / fechamento dos vertedouros.

Estas restrições serão vistas com detalhes na seção 4.3.

### 3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DO VERTIMENTO / DESVIO

Nesta seção, apresenta-se a formulação matemática da modelagem do vertimento e desvio nas usinas hidroelétricas. Serão detalhadas apenas questões específicas associadas a estas variáveis. Uma descrição detalhada da representação destas variáveis nas equações de balanço hídrico do modelo é apresentada em [5].

Conforme mencionado anteriormente, o modelo DESSEM-PAT possui dois módulos: um módulo de simulação (denominado de SIMHIDR) e um módulo de otimização. Como o módulo de simulação tem como objetivo apenas realizar a simulação hidráulica para um despacho já determinado, optou-se por uma representação menos restrita da operação dos reservatórios, já que os valores de meta de geração já irão nortear a operação das usinas. Desta forma, **o vertimento e o desvio são sempre liberados no módulo de simulação.**

Para simplificar a exposição, ao longo desta seção será feita referência apenas à modelagem do vertimento na otimização. A modelagem do desvio é feita de forma idêntica, porém considerando a cota de soleira de desvio no lugar da cota de soleira do vertedouro. As únicas restrições tratadas nesta seção que não se aplicam à variável desvio, na versão 7.0 do modelo DESSEM-PAT, são as restrições “soft” de variação de vertimento (seção 4.4).

#### 3.1. Proibição ou não do vertimento em função da cota da soleira

Para o módulo de otimização, adota-se a seguinte regra para determinar se uma usina hidroelétrica pode ou não verter em cada instante  $t$  da discretização temporal:

- se a usina for a fio d'água, o vertimento é sempre liberado;
- se a usina tiver reservatório e for de regularização diária (*flag* “D” no cadastro de usinas hidroelétricas), o vertimento também é sempre liberado;
- se a usina tiver reservatório e for de regularização semanal ou mensal (*flags* “S” ou “M” no cadastro de usinas hidroelétricas), o vertimento é permitido segundo a regra abaixo:

se  $V_{disp} \geq V_{solvt} \Rightarrow$  vertimento é liberado

se  $V_{disp} < V_{solvt} \Rightarrow$  vertimento é proibido

O cálculo de  $V_{disp}$  depende do tipo de estratégia de resolução adotada para o módulo de otimização e a etapa de resolução em que o modelo se encontra (vide [6]), conforme especificado a seguir:

- na etapa de **pré-processamento** ou nas etapas de **PL-único ou decomposição de Benders sem pré-processamento**, o volume disponível para se tomar a decisão de liberar ou proibir o vertimento para cada usina  $i$  em cada instante  $t$  é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{disp}^t = V_i^0 + \sum_{\tau=1}^t (I_i^\tau - Q_{ret}^\tau) \quad (3.1)$$

onde  $V_i^0$  é o volume armazenado de  $i$  no início do horizonte de otimização,  $I_i^\tau$  e  $Q_{ret}^\tau$  são as vazões incrementais naturais e as retiradas de água (para irrigação, por exemplo) ocorridas no instante  $\tau$ . Considera-se nesse cálculo todo o volume de água que chegará certamente à usina até o instante  $t$ , ou seja, às afluências naturais incrementais deste  $\tau=0$  até  $\tau=t$ , descontadas as retiradas de água;

- na etapa de **simulação final do modo Benders sem pré-processamento**, o volume disponível em cada instante  $t$  corresponde ao volume armazenado no início do instante  $t$ ;
- Na etapa de **PL-único ou decomposição de Benders após pré-processamento**, o volume disponível em cada instante  $t$  corresponderá ao volume armazenado ao final do instante  $t$  na última iteração da etapa de pré-processamento.

### 3.2. Limite da variável vertimento em função da cota da soleira

Na etapa anterior, decide-se se uma usina pode ou não verter. Uma vez liberado o vertimento, deve-se definir a vazão máxima que pode ser vertida ou desviada no período. Este valor é de difícil definição, pois nas situações em que o armazenamento da usina está apenas um pouco acima do volume referente à soleira de vertedouro, um vertimento elevado pode fazer com que a usina fique abaixo deste volume e passe a não poder verter, fazendo com que a decisão de liberar o vertimento tivesse sido equivocada.

Não há informação sobre o vertimento máximo físico do vertedouro no cadastro de usinas hidroelétricas. Desta forma, considera-se como limite máximo de vertimento todo o volume

de água acima da cota de soleira de vertedouro. Desta forma, o valor de vertimento máximo  $\overline{S}_i^t$  considerado para cada usina  $i$  e período  $t$  no modelo DESSEM-PAT é dado por:

$$\overline{S}_i^t = V_{disp_i}^t + \sum_{j \in M_i} Q_{max_j}^t - V_{solvt_i} \cdot \quad (3.2)$$

onde  $Q_{max_j}^t$  é a vazão máxima turbinável nas usinas  $j$  que pertencem ao conjunto  $M_i$  de usinas imediatamente à montante da usina  $i$ . Assume-se que, caso o modelo decida verter na usina  $i$  no período  $t$ , as usinas de montante podem “socorrer” a usina  $i$  até o seu valor de turbinamento máximo.

É importante observar que, no modelo DESSEM-PAT, não são mais utilizadas as restrições de vertimento máximo para usinas hidroelétricas descritas em [7], devido aos problemas práticos de sua utilização, decorrentes da não convexidade da restrição de soleira de vertedouro.

### 3.3. Restrições operativas de limite de vertimento

Além da limitação na variável vertimento em si no PL, podem-se também impor restrições de limite máximo de vertimento para cada usina e período, ao longo do horizonte de estudo. Estas restrições possuem a seguinte formulação:

$$S_{i_{min}}^t \leq S_i^t \leq S_{i_{max}}^t, \quad (3.3)$$

onde  $S_{i_{min}}^t$  e  $S_{i_{max}}^t$  são os limites de vertimento (opcionais) fornecidos no arquivo OPERUH (vide seção 4.3), e que podem ser diferenciados por usina e/ou período de tempo.

### 3.4. Restrições de variação máxima de vertimento

Um outro ponto importante na modelagem do vertedouro é que há restrições físicas na variação horária de vertimento das usinas, devido às manobras de operação de vertedouro. Na ausência de dados cadastrais para essa variação horária máxima permitida para o vertimento, pode-se optar por utilizar dois tipos de restrições no modelo DESSEM-PAT, as quais são descritas nas seções 3.4.1 e 3.4.2, e que podem ser utilizadas tanto no módulo de simulação quanto no módulo de otimização.

### 3.4.1. Restrições “hard” de variação de vertimento

Estas restrições são definidas no arquivo OPERUH (vide seção 4.3), e correspondem a uma imposição de que a variação de vertimento entre intervalos de tempo consecutivos atenda a determinado limites máximo de rampa. A fim de evitar que o PL se torne inviável (seja o “PL único” ou um determinado subproblema na decomposição de Benders), incluem-se variáveis de folga para essas restrições, conforme mostra a expressão (3.4) abaixo:

$$-\Delta S_{i_{\max}^-}^t \leq S_i^t - S_i^{t-1} + F_i^+ - F_i^- \leq \Delta S_{i_{\max}^+}^t, \quad (3.4)$$

onde  $\Delta S_{i_{\max}^+}^t$  e  $-\Delta S_{i_{\max}^-}^t$  são as variações máximas permitidas para cima ou para baixo, respectivamente, na vazão vertida ente períodos de tempo consecutivos. Estes limites podem ser fornecidos em valores absolutos ou em valores relativos (ou seja, em relação à vazão na hora anterior). Na implementação dessas restrições no problema de otimização multi-estágio, seus limites são ajustados de acordo com a duração de cada período, de forma que, para um mesmo limite de variação horária na vazão, períodos de maior duração podem apresentar maiores variações em valores absolutos.

As variáveis de folga  $F_i^+$  e  $F_i^-$  são fortemente penalizadas na função objetivo, portanto essas restrições somente são violadas se não houver uma solução viável para todas as restrições do problema. Em outras palavras estas restrições somente são violadas caso sua não violação resulte na violação de alguma outra restrição física ou restrição operativa “hard” do problema. Caso algumas dessas variáveis de folga assumam um valor diferente de zero na solução do PL, a restrição original (sem o uso das variáveis de folga) estaria sendo violada, e esta violação é reportada nos arquivos de saída do modelo (vide [1]).

### 3.4.2. Restrições “soft” de variação de vertimento (RIVAR)

As restrições do período anterior são ditas “hard” porque necessitam ser atendidas. Entretanto, muitas vezes não se quer **impor** que não haja variações excessivas de vertimento, mas apenas se **deseja** que tais variações não ocorram. Ou seja, apesar de não haver um limite físico ou operativo de variação, deseja-se que, em caso de indiferença em termos de custo, o modelo opte por uma solução que tenha um vertimento estável (*flat*) ao longo do horizonte de estudo,

em relação a uma outra solução que apresente variações muito bruscas de vertimento entre períodos de tempo consecutivos.

Para modelar esse “desejo”, implementaram-se as chamadas restrições “soft” de vertimento, que são formuladas da seguinte forma:

$$S_i^t - S_i^{t-1} + f_i^+ - f_i^- = 0 \quad (3.5)$$

onde  $f_i^+$  e  $f_i^-$  possuem valores de penalidade muito baixos na função objetivo, que são várias ordens de grandeza menor do que os custos reais de operação do sistema.

Observe que, como as variáveis de folga em (3.5) incorrem em um aumento no custo operativo, **em caso de indiferença**, o modelo naturalmente irá preferir uma solução que apresente valores iguais (ou muito próximos) para  $S_i^t$  e  $S_i^{t-1}$  a uma solução que apresente valores muito diferentes para essas variáveis. No entanto, se tal variação no vertimento promover uma redução real nos custos operativos do sistema (devido às outras restrições do problema), o modelo naturalmente irá buscar essa outra solução, já que um aumento nos valores de  $f_i^+$  e  $f_i^-$  irá custar muito menos do que essa eventual economia na operação.

Na documentação do modelo, estas restrições também são conhecidas como “restrições internas de variação”, e referenciadas nos relatórios de saída do modelo pelo mnemônico RIVAR.

### 3.5. Penalidades para as variáveis de vertimento / desvio

Em algumas situações, o sistema pode estar em uma situação muito “folgada” para atendimento à demanda do sistema, ou seja, com as usinas em um nível de armazenamento muito alto e muitas delas até vertendo. Nestes casos, o valor da água pode se tornar igual a zero, fazendo com que seja indiferente entre verter uma unidade de água ou armazená-la no reservatório.

Nestas situações de indiferença, em geral se opta pelo tipo de operação mais conservadora, ou seja, armazenar a água no reservatório, já que os prejuízos de um eventual aumento de vertimento no futuro tendem a ser bem menores do que os prejuízos de um (improvável)



acionamento de uma usina térmica no futuro próximo. Para forçar o modelo a operar desta forma, introduz-se uma penalidade bem pequena para a variável vertimento, de forma que, nessas situações de indiferença, seja mais barato matematicamente armazenar água no reservatório do que verter.

O valor dessa penalidade deve ser calibrado de maneira cuidadosa, para que não seja muito alto de forma a perturbar os custos reais de operação do sistema nem muito baixo de forma a não ser “percebido” pelo pacote de programação linear, devido a suas tolerâncias para avaliação da otimalidade da solução. Além disso, deve-se tomar cuidado em relacionar, de forma adequada, o valor dessa penalidade com os valores de penalidades das demais variáveis do problema, como por exemplo os intercâmbio entre subsistemas<sup>1</sup>. Finalmente, deve-se procurar uma compatibilização entre os valores de penalidade utilizados nos modelos DESSEM-PAT e DECOMP.

O valor adotado para essa penalidade no modelo DESSEM-PAT, na versão 7.0, é de 0,2 R\$/hm<sup>3</sup>. Este valor atende aos seguintes critérios:

- ser menor do que o custo de intercâmbio, para evitar que o modelo “exporte” vertimento entre subsistemas, quando são consideradas perdas na transmissão;
- ser ao máximo possível compatível com o modelo DECOMP, cujo valor é de 0,01 R\$/hm<sup>3</sup>. Não foi possível adotar o mesmo valor do DECOMP, pois o pacote de programação linear não estava sendo sensível a esse valor. Isto ocorre porque, no modelo DESSEM-PAT, a magnitude dos custos presentes de operação de um determinado estágio (nos quais se inclui a penalidade de vertimento) é muito menor do que o custo futuro, devido aos pequenos intervalos de discretização utilizados para modelar o problema de PDO.

---

<sup>1</sup> as variáveis de intercâmbio também necessitam de penalidade, para evitar que o modelo realize intercâmbios desnecessárias, como por exemplo fazer a energia ir e voltar entre dois pontos no mesmo instante de tempo e patamar de carga.

#### 4. DADOS PARA A MODELAGEM DO VERTIMENTO

Nesta seção, descrevem-se os dados de entrada necessários para utilizar as opções de modelagem do vertimento apresentadas nesse relatório nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT. Uma descrição mais detalhada do formato desses dados é feita no Manual do Usuário do Modelo [1].

##### 4.1. Dados dos reservatórios

O conjunto de usinas hidroelétricas na configuração e os seus dados físicos e operativos já são fornecidos nos arquivos de entrada do modelo e no arquivo de cadastro das usinas hidroelétricas. Dentre estes dados, incluem-se os valores de  $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$ ,  $V_{solvt}$  e  $V_{solds}$  para cada usina, mencionados ao longo deste documento. Estes dados podem ser alterados via registros AC no arquivo ENTDADOS.XXX.

##### 4.2. Restrições operativas de limite de vertimento

As restrições operativas de limite de vertimento / desvio são declaradas no arquivo OPERUH, dentre outras restrições operativas diversas para as usinas hidroelétricas. A Tabela 4.1 descreve os dados necessários para definir essas restrições:

**Tabela 4.1 - Dados de entrada para as restrições operativas de limite de vertimento.**

Dado	Notação	Localização
Número da restrição e identificação da usina e janela de tempo a qual se aplica	-	Registros do arquivo OPERUH
Código de identificação do tipo de variável que está sendo restrita (neste documento, vertimento ou desvio)	-	Registros do arquivo OPERUH
Flag para identificar que se trata de uma restrição de limite	-	Registros do arquivo OPERUH
Limites mínimo e máximo de vertimento / desvio por usina e período	$S_{i\min}^t, S_{i\max}^t$ ou $Q_{di\min}^t, Q_{di\max}^t$	Registros do arquivo OPERUH

##### 4.3. Restrições operativas “hard” de variação de vertimento

As restrições operativas de variação também são fornecidas no arquivo OPERUH, conforme mostra a Tabela 4.2 a seguir.

**Tabela 4.2 - Dados de entrada para as restrições operativas “hard” de variação de vertimento.**

Dado	Notação	Localização
Número da restrição e identificação da usina e janela de tempo a qual se aplica	-	Registros do arquivo OPERUH
Código de identificação do tipo de variável que está sendo restrita (neste documento, vertimento ou desvio)	-	Registros do arquivo OPERUH
Flag para identificar que se trata de uma restrição de variação	-	Registros do arquivo OPERUH
Rampa máxima para acréscimo ou decréscimo horário no valor da vazão vertida / desviada	$\Delta S_{i \max}^t$ , $\Delta S_{i \max}^{t+}$ $\Delta Q_{di \max}^t$ , $\Delta Q_{di \max}^{t+}$	Registros do arquivo OPERUH

Os valores de penalidade não são informados pelo usuário, uma vez que se utilizam valores default que devem estar em consonância com as penalidades “hard” para as demais restrições do problema.

#### 4.4. Restrições “soft” de variação de vertimento

A indicação para inclusão destas restrições é feita nos registros BB do arquivo ENT-DADOS.XXX. Podem-se impor restrições para usinas específicas ou para todas as usinas. Uma vez inserida a restrição, esta é válida para todo o horizonte de simulação e otimização.

**Tabela 4.3 - Dados de entrada para as restrições operativas “soft” de variação de vertimento**

Dado	Notação	Localização
Identificação da usina e do tipo de variável que está sendo restrita (neste exemplo, vertimento)	-	Registros BB do arquivo ENT-DADOS.XXX
Valor “soft” de penalidade	$C_{\Delta vert}$	Registros BB do arquivo ENT-DADOS.XXX

---

Não são permitidas restrições para variação horária no desvio, uma vez que não se identificou, até o momento, a necessidade prática da inclusão de tais restrições no modelo DESSEM-PAT.

#### **4.5. Validação e Processamento dos Dados**

- Não há nenhuma validação ou processamento especial para estes dados, apenas a verificação se o limite inferior para a restrição de limite de vertimento é menor do que o limite superior, para a mesma usina e período.

---

## 5. RELATÓRIOS DE SAÍDA

Os relatórios referentes à funcionalidade de vertimento e desvio das usinas hidroelétricas são mostrados nos arquivos relacionados a seguir:

**SIM\_VERT / SIM\_DESV / PDO\_VERT / PDO\_DESV:** Relatório detalhado da operação do vertedouro / desvio durante o horizonte de simulação / otimização. Indica-se qual a decisão tomada (liberar ou proibir) em relação ao vertimento / desvio de cada usina em cada período de tempo, e se houve problemas na modelagem, os quais podem ser de dois tipos: a usina verteu / desviou estando com o volume médio do período abaixo da respectiva soleira, ou a usina teve o vertimento / desvio proibido estando com o volume acima da respectiva soleira.

**LOG\_VERT / LOG\_DESV:** Relatório no mesmo formato dos PDO\_VERT / PDO\_DESV / SIM\_VERT / SIM\_DESV, porém destacando apenas as situações onde houve problemas na modelagem do vertimento / desvio;

**SIM\_RIVAR / PDO\_RIVAR :** Relatório com o comportamento das variáveis cujas variações desejou-se controlar por meio das restrições *soft* de variação, ao longo do período de simulação / otimização. Entre estas variáveis, inclui-se a variável vertimento (vide seção 4.4).

## 6. ESTUDO DE CASO

Nesta seção ilustra-se a modelagem do vertimento no modelo DESSEM-PAT, em um estudo de caso que contém 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 das funcionalidades avaliadas neste relatório. Os dados nos arquivos de entrada do modelo DESSEM-PAT referentes a estas informações são reproduzidos na Figura 6.1.

```

&X dd hr mh durac rede Patamar
& XX XX X XXXXX X XXXXXX
TM 15 0 0 7.0 1 LEVE
TM 15 7 0 12.0 1 MEDIA
TM 15 19 0 3.0 1 PESADA
TM 15 22 0 2.0 1 MEDIA
TM 16 0 0 7.0 1 LEVE
TM 16 7 0 12.0 1 MEDIA
TM 16 19 0 3.0 1 PESADA
TM 16 22 0 2.0 1 MEDIA
TM 17 0 0 7.0 1 LEVE
TM 17 7 0 12.0 1 MEDIA
TM 17 19 0 3.0 1 PESADA
TM 17 22 0 2.0 1 MEDIA
-----
DISC
& dd Hr Mn DURACAO
& XX XX X XXXXX
13 00 0 12
13 12 0 12
14 00 0 12
14 12 0 12
    
```

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

Um resumo desses dados é apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Dados resumidos do horizonte e discretização temporal.

	Simulação	Otimização
Instante de Início	13/09/2019 – 00:00	15/09/2019 – 00:00
Instante de Término	15/09/2019 – 00:00	18/09/2019 – 00:00
Nº períodos	4	12
Duração dos períodos	12h cada	variável

### 6.2. Dados para a modelagem de vertimento

Os dados do estudo específicos da modelagem do vertimento, tratada neste relatório, são descritos a seguir:

### 6.2.1. Restrições “soft” de vertimento

Foi inserido o seguinte registro BB no arquivo ENTADADOS.XXX:

```

& iuh tp penal
& XXX XX XXXXXXXXXXXX
BB 999 4 0.000
-
    
```

**Figura 6.2 – Registro BB do arquivo ENTADADOS.XXX para restrição soft de vertimento em todas as usinas hidroelétricas.**

Como o número indicado para a usina é “999”, a restrição é aplicada a todas as usinas hidroelétricas no estudo. Conforme será visto adiante, será feito um estudo de sensibilidade em relação ao valor aplicado para a penalidade.

### 6.2.2. Restrições de limite de vertimento

Foram impostas as seguintes restrições operativas de limite de vertimento em algumas usinas hidroelétricas no arquivo OPERUH:

```

LIM_USI
&ID  USI      nome      T CD di hi m df hf m fator  lim.inf  lim.sup  Justificativa
&XXX XXX  XXXXXXXXXXXX X XX XX XX X XX XX X xxxxx  XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
40001 45  JUPIA      H 4 I      F      1.0      200
40002 18  A. VERMELH H 4 I      F      1.0      100
    
```

**Figura 6.3 – Restrições de limite de vertimento no arquivo OPERUH.**

Estes dados resultam em um vertimento máximo de 200m<sup>3</sup>/s para a usina de Jupia (45) e de 200 m<sup>3</sup>/s para a usina de Água Vermelha (18).

### 6.2.3. Restrições operativas (“hard”) de variação de vertimento

Foram impostas as seguintes restrições operativas de variação máxima para vertimento no arquivo OPERUH:

```

VAR_USI
&ID  us      nome      T CD di hi midf hf mfRamp-  Ramp +  Ramp&b -  Ramp&b +  Valor t=0  Justif
&XX XXX  XXXXXXXXXXXX X XX XX XX X XX XX X XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
002 046  PRIMAVERA H 4 I      F      100      100
003 082  SALTO CAXIAS H 4 I      F      40      40
    
```

Figura 6.4 – Restrições “hard” de variação máxima de vertimento no arquivo OPERUH.

Estes dados resultam em uma rampa de no máximo  $100(m^3/s)/h$  para cima ou para baixo para a usina de Porto Primavera (46) e de no máximo  $40(m^3/s)/h$  para cima ou para baixo para a usina de Salto Caxias (82).

### 6.3. Resultados de convergência

A Figura 6.6 mostra o relatório de execução do modelo para a resolução do problema de simulação com decomposição por bacias, e do problema de otimização pelo modo PL-único. Adotou-se uma penalidade inicial para as restrições “soft” de variação de vertimento igual a zero, conforme mostra a Figura 6.2. Observe que a adoção desse valor torna esse caso equivalente a um caso onde não houvesse tais restrições.

```

-----
RELATORIO DE EXECUCAO DA SIMULACAO
-----
X-----X-----X-----X-----X
  Bacia  #usi  tempo          Custo
          (mm:sg)      (1000$)
X-----X-----X-----X-----X
   1      1    0:00           3.3858
   2     18    0:00      154488.6204
   3      8    0:00           8.8658
   4     60    0:00     336866.9656
   5      5    0:00          27.9704
   6      8    0:00      165.8653
   7      1    0:00           4.5811
   8      4    0:00       82.3370
   9      3    0:00          6.9174
  10      9    0:00     262.1996
  11      1    0:00           4.6814
  12      1    0:00           0.4821
  13      6    0:00     242.2085
  14      1    0:00           1.4699
  15      1    0:00           0.0005
  16      1    0:00           0.7215
  17      1    0:00           0.5321
  18      1    0:00           2.5218
  19      1    0:00           1.8448
  20      2    0:00          7.0396
  21      1    0:00           0.8880
  22      1    0:00           4.3271
  23      2    0:00         10.5979
  24      1    0:00           0.0081
  25      2    0:00           3.9027
X-----X-----X-----X-----X

=====
CUSTO TOTAL DE SIMULACAO:          492198.9345
=====
    
```

Figura 6.5 - Relatório de execução – resolução do problema de simulação com decomposição por bacia.



Relatório Técnico – 1004 / 11

```

-----
RELATORIO DE EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO
-----

Cálculo da Programação Diária da Operação
Método: PL Único

Funcao objetivo do Problema Linear (FOBJ): 40341862.3 (1000$)
Custo futuro de operacao (ALFA)           : 39208286.0 (1000$)
Custo Presente (FOBJ-ALFA)                : 1133576.3 (1000$)

-----
RESOLUCAO DO PROBLEMA FINALIZADA COM SUCESSO
-----
    
```

Figura 6.6 - Relatório de execução – resolução do problema de otimização por PL-Único.

6.4. Relatórios de operação de vertedouro e desvio

A Figura 6.7 e Figura 6.8 ilustram, respectivamente, trechos dos relatórios de operação de vertimento e desvio para o problema da simulação. Os relatórios de operação para o período de otimização seguem o mesmo formato.

IPER	ITER	IDES	Pat	USIH	Nome	Vdisp.	VolSol.	Reg.	Tratamento PL	Vert	Problema	Delta Vert
-	-	-	-	-	-	( Total	hm3 )		Status ; Vertmax	(m3/s)	-	(m3/s)
1	-	SIMUL	-	1	CAMARGOS	559.09	418.97	M	LIBER	0.00		12941.89
1	-	SIMUL	-	2	ITUTINGA	9.60	11.00	D	LIBER	19.26	VERTEU ABAIXO	222.30
1	-	SIMUL	-	4	FUNIL-GRANDE	270.42	304.00	D	LIBER	0.00		6259.70
1	-	SIMUL	-	24	EMBORCACAO	9763.17	10626.45	M	LIBER	0.00		225999.37
1	-	SIMUL	-	27	CAPIM BRANC1	235.56	228.27	M	LIBER	0.00		5452.66
1	-	SIMUL	-	28	CAPIM BRANC2	877.05	878.00	D	LIBER	27.99	VERTEU ABAIXO	20301.97
1	-	SIMUL	-	25	NOVA PONTE	9265.05	5500.05	M	LIBER	0.00		214468.67
1	-	SIMUL	-	33	SÃO SÍMÃO	10454.67	7000.00	M	LIBER	0.00		242006.30
1	-	SIMUL	-	156	TRES MARIAS	12044.20	8526.31	M	LIBER	0.00		278800.91
1	-	SIMUL	-	9	JAGUARA	426.68	450.00	D	LIBER	13.98	VERTEU ABAIXO	9876.85
1	-	SIMUL	-	11	VOLTA GRANDE	2134.90	2244.00	D	LIBER	0.00		49418.93
1	-	SIMUL	-	134	SALTO GRANDE	65.63	78.00	D	LIBER	0.00		1519.17
1	-	SIMUL	-	26	MIRANDA	1068.87	975.00	M	LIBER	36.69		24742.36
1	-	SIMUL	-	10	IGARAPAVA	237.72	480.00	D	LIBER	0.00		5502.69
1	-	SIMUL	-	143	AIMORES	162.19	156.55	D	LIBER	63.96		3754.42
1	-	SIMUL	-	162	QUEIMADO	363.67	212.12	M	LIBER	0.00		8418.28
1	-	SIMUL	-	148	IRAPE	4818.59	2268.00	M	LIBER	0.00		111541.33
1	-	SIMUL	-	14	CACONDE	298.65	363.98	M	LIBER	0.00		6913.22
1	-	SIMUL	-	18	A. VERMELHA	8236.59	5856.00	M	LIBER	0.00		190661.83
1	-	SIMUL	-	37	BARRA BONITA	2132.32	1028.06	M	LIBER	0.00		49359.17
1	-	SIMUL	-	40	PROMISSAO	6686.73	5280.00	M	LIBER	0.00		154785.33
1	-	SIMUL	-	42	NAVANHANDAVA	2688.39	2720.00	D	LIBER	103.22	VERTEU ABAIXO	62231.25
1	-	SIMUL	-	15	E. DA CUNHA	13.63	14.00	D	LIBER	0.00		315.45
1	-	SIMUL	-	16	A.S.OLIVEIRA	23.69	25.00	D	LIBER	0.00		548.35

Figura 6.7 - Trecho do relatório de operação de vertimentos (SIM\_VERT).

Relatório Técnico – 1004 / 11

IPER	ITER	IDES	Pat	USIH	Nome	Vdisp	Volsol	Reg	Tratamento PL	Desvio	Problema	Delta Desv
-	-	-	-	-	-	( Total	mm3	-	Status	Desvmax	-	(m3/s)
1	-	SIMUL	-	34	I. SOLTEIRA	17849.76	8232.00	M	LIBER	-	0.00	413188.89
1	-	SIMUL	-	43	TRES IRMAOS	11969.31	9923.00	M	LIBER	-	0.00	277067.47
1	-	SIMUL	-	124	LAJES	369.77	102.00	M	LIBER	-	0.00	8559.53
1	-	SIMUL	-	180	TOCOS	1.95	2.00	D	LIBER	-	0.00	45.06
1	-	SIMUL	-	107	EDGARD SOUZA	2.28	0.10	D	LIBER	-	0.00	52.86
1	-	SIMUL	-	118	BILLINGS	781.61	0.98	M	LIBER	-	6.01	18092.93
1	-	SIMUL	-	73	JORDAO	97.48	85.00	M	LIBER	-	0.00	2256.37
1	-	SIMUL	-	173	MOXOTO	2391.34	1226.00	D	LIBER	-	1404.25	55355.01
1	-	SIMUL	-	182	VIGARIO	9.58	38.00	D	LIBER	-	0.00	221.82
2	-	SIMUL	-	34	I. SOLTEIRA	17893.29	8232.00	M	LIBER	-	0.00	414196.56
2	-	SIMUL	-	43	TRES IRMAOS	11952.53	9923.00	M	LIBER	-	0.00	276678.91
2	-	SIMUL	-	124	LAJES	369.90	102.00	M	LIBER	-	0.00	8562.53
2	-	SIMUL	-	180	TOCOS	1.69	2.00	D	LIBER	-	0.00	39.06
2	-	SIMUL	-	107	EDGARD SOUZA	1.91	0.10	D	LIBER	-	0.00	44.31
2	-	SIMUL	-	118	BILLINGS	780.83	0.98	M	LIBER	-	18.53	18074.78
2	-	SIMUL	-	73	JORDAO	100.75	85.00	M	LIBER	-	0.00	2332.26
2	-	SIMUL	-	173	MOXOTO	2385.33	1226.00	D	LIBER	-	1543.24	55216.02
2	-	SIMUL	-	182	VIGARIO	8.53	38.00	D	LIBER	-	0.00	197.47
3	-	SIMUL	-	34	I. SOLTEIRA	17896.99	8232.00	M	LIBER	-	0.00	414282.20
3	-	SIMUL	-	43	TRES IRMAOS	11925.80	9923.00	M	LIBER	-	0.00	276060.17

Figura 6.8 - Relatório de operação de desvios (SIM\_DESV).

Note que, nas situações em que a usina verteu abaixo do vertedouro, o volume disponível (coluna “Vdisp”) está bem próximo ao volume da soleira (coluna “Volsol”). Isto indica que o reservatório está na condição limítrofe entre poder ou não verter, quando é maior a possibilidade do modelo se “enganar” ao proibir ou liberar o vertimento, visto que esta decisão deve ser tomada antes de se conhecer o resultado da operação.

### 6.5. Relatórios das restrições internas (“soft”) de variação

A Figura 6.9 ilustra um trecho do relatório de avaliação das variações de vertimento em períodos de tempo consecutivos. Houve diversos vertimentos no período 1, e as grandes variações negativas ocorrem porque os valores de vertimento foram nulos no período 2. Ressalta-se que, neste primeiro caso exemplo, o valor de penalidade para as restrições *soft* de vertimento foi igual a zero.

-----									
;									
;									
-----									
IPER	IND	TIPO	NUM	Entidade Nome	Unid	Valor I	Valor F	variacao Abs ; (%)	
-----									
2	1	VERTIMENTO	1	CAMARGOS	m3/s	34.02	0.00	-34.02	100.0
2	2	VERTIMENTO	2	ITUTINGA	m3/s	34.00	0.00	-34.00	100.0
2	3	VERTIMENTO	4	FUNIL-GRANDE	m3/s	68.00	0.00	-68.00	100.0
2	4	VERTIMENTO	24	EMBORCACA0	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	5	VERTIMENTO	27	CAPIM BRANC1	m3/s	65.45	0.00	-65.45	100.0
2	6	VERTIMENTO	28	CAPIM BRANC2	m3/s	67.60	0.00	-67.60	100.0
2	7	VERTIMENTO	25	NOVA PONTE	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	8	VERTIMENTO	33	SÃO SIMÃO	m3/s	450.00	0.00	-450.00	100.0
2	9	VERTIMENTO	156	TRES MARIAS	m3/s	58.00	0.00	-58.00	100.0
2	10	VERTIMENTO	9	JAGUARA	m3/s	227.00	0.00	-227.00	100.0
2	11	VERTIMENTO	11	VOLTA GRANDE	m3/s	235.00	0.00	-235.00	100.0
2	12	VERTIMENTO	134	SALTO GRANDE	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	13	VERTIMENTO	26	MIRANDA	m3/s	64.00	0.00	-64.00	100.0
2	14	VERTIMENTO	10	IGARAPAVA	m3/s	228.51	0.00	-228.51	100.0
2	15	VERTIMENTO	143	AIMORES	m3/s	205.00	0.00	-205.00	100.0
2	16	VERTIMENTO	162	QUEIMADO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	17	VERTIMENTO	148	IRAPE	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	18	VERTIMENTO	14	CACONDE	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	19	VERTIMENTO	18	A. VERMELHA	m3/s	100.00	0.00	-100.00	100.0
2	20	VERTIMENTO	37	BARRA BONITA	m3/s	91.00	0.00	-91.00	100.0
2	21	VERTIMENTO	40	PROMISSAO	m3/s	149.00	0.00	-149.00	100.0
2	22	VERTIMENTO	42	NAVANHANDAVA	m3/s	151.69	0.00	-151.69	100.0
2	23	VERTIMENTO	15	E. DA CUNHA	m3/s	11.95	0.00	-11.95	100.0
2	24	VERTIMENTO	16	A.S.OLIVEIRA	m3/s	11.93	0.00	-11.93	100.0
2	25	VERTIMENTO	38	A.S. LIMA	m3/s	102.56	0.00	-102.56	100.0
2	26	VERTIMENTO	39	IBITINGA	m3/s	128.00	0.00	-128.00	100.0
2	27	VERTIMENTO	62	TAQUARUCU	m3/s	198.17	0.00	-198.17	100.0
2	28	VERTIMENTO	63	ROSANA	m3/s	223.41	0.00	-223.41	100.0
2	29	VERTIMENTO	52	CANOAS I	m3/s	97.56	0.00	-97.56	100.0
2	30	VERTIMENTO	51	CANOAS II	m3/s	95.57	0.00	-95.57	100.0
2	31	VERTIMENTO	47	A.A. LAYDNER	m3/s	55.00	0.00	-55.00	100.0
2	32	VERTIMENTO	49	CHAVANTES	m3/s	72.50	0.00	-72.50	100.0
2	33	VERTIMENTO	61	CAPIVARA	m3/s	192.00	0.00	-192.00	100.0

Figura 6.9 - Trecho do relatório de variações de vertimento no módulo de otimização (PDO\_RIVAR).

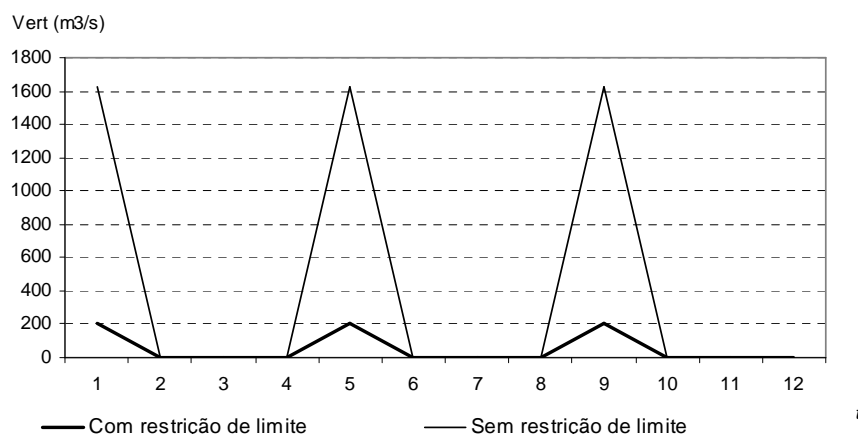
## 6.6. Análise de sensibilidade do modelo

Apresenta-se, a seguir, uma análise de sensibilidade, em termos de solução e custo de operação, quando se utilizam ou não restrições “soft” ou “hard” para o vertimento nas usinas hidroelétricas.

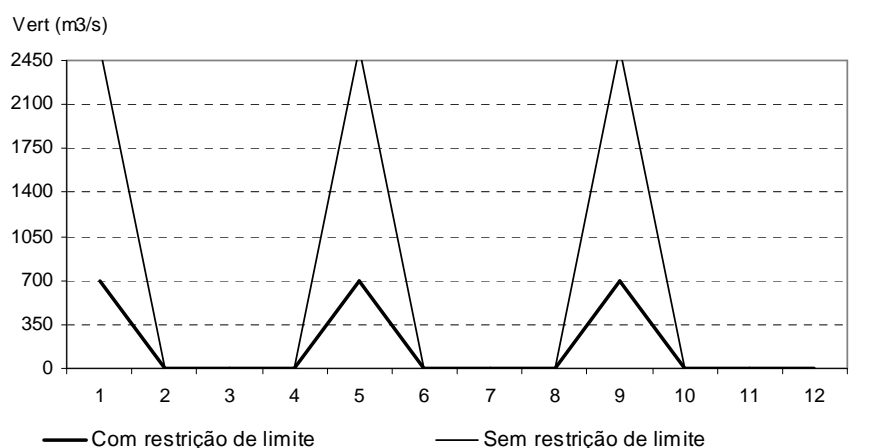
### 6.6.1. Sensibilidade em relação às restrições “hard” de limite de vertimento e de variação de vertimento (arquivo OPERUH)

Apresenta-se, nesta seção, uma análise de sensibilidade, em termos de solução e custo de operação para o horizonte de otimização, quando se utilizam ou não restrições “hard” de variações de vertimento para as usinas indicadas na Figura 6.3 e na Figura 6.4.

A Figura 6.10 mostra o impacto da aplicação da restrição de limite de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  para a usina de Jupuíá, e a Figura 6.11 mostra o impacto da aplicação da restrição “hard” de variação de vertimento de  $100 (\text{m}^3/\text{s})/\text{h}$  para a usina de Porto Primavera.



**Figura 6.10 - Operação de vertimento da usina de Jupuíá, com ou sem a restrição de limite de vertimento de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ .**



**Figura 6.11 - Operação de vertimento de Porto Primavera, com ou sem a restrição “hard” de limite de variação de vertimento de  $100 (\text{m}^3/\text{s})/\text{h}$ .**

Este caso se caracteriza por vertimentos em diversas usinas nos períodos de carga leve (1, 5 e 9). Observe que ambas as restrições tiveram como resultado a diminuição do vertimento das usinas nesses períodos: no primeiro caso (Jupuíá), o vertimento ficou limitado ao limite de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Já no segundo caso, o vertimento ficou limitado ao limite de variação máxima de  $(100 \text{ m}^3/\text{s})/\text{h}$ , da seguinte forma: como os vertimentos nos períodos adjacentes aos períodos 1, 5 e 9

são iguais a zero, o máximo vertimento nestes períodos foi de  $7 \times 100 = 700 \text{ m}^3/\text{s}$ , visto que a duração do período 2 da otimização é de 7h, conforme mostra a Figura 6.1.

A Tabela 6.2 compara os custos de operação com ou sem as restrições de limite e variação de vertimento no arquivo OPERUH. Para que essa comparação fosse possível, foi necessário remover o período de simulação, para garantir que, em ambos os casos, o problema de otimização fosse exatamente o mesmo<sup>1</sup>.

**Tabela 6.2 Comparação entre os custos de operação utilizando-se ou não as restrições de limite e de variação de vertimento**

	Aplicação das restrições “hard” de limite e variação da Figura 6.3 e Figura 6.4	
	Não	Sim
Custo de operação (1000R\$)	40.303.120.0	40.303.120.0

É interessante notar que a diminuição brusca de vertimento causada pelas restrições de limite e variação não resultou em uma variação de custo que pudesse ser visualizada no relatório de saída. Isto indica que a forma como ocorrem os elevados vertimentos (concentrado nos períodos de carga leve ou melhor distribuídos nos períodos adjacentes) não são relevantes em termos de custo da solução para o problema de otimização.

### 6.6.2. Sensibilidade de variações de vertimento com o valor da penalidade *soft*

Espera-se que a penalidade “soft” tenha como resultado uma redução brusca nos vertimentos ocorridos nos períodos de carga leve, uma vez que as variações em relação aos vertimentos dos períodos adjacentes passam a ser penalizados na função objetivo.

A Figura 6.12 e a Figura 6.13 mostram as variações de vertimento ocorridas em algumas usinas para o período 2 em relação ao período 1, quando se utilizam valores de penalidade iguais a zero e 0,1, respectivamente. Percebe-se como é brusca a redução geral nos vertimentos. Verifica-se ainda que, quando se aplicou a penalidade de variação de vertimento, o modelo preferiu, para algumas usinas como Passo Real (vide detalhe em linha pontilhada),

<sup>1</sup> A aplicação das restrições na simulação apenas para o caso com OPERUH faria com que os resultados da simulação dos dois casos fossem diferentes, resultando em pontos de partida diferentes para a otimização e, conseqüentemente, problemas de programação linear diferentes para o módulo de otimização.

Relatório Técnico – 1004 / 11

distribuir os vertimentos entre os períodos 1 e 2, ao invés de concentrar os vertimentos em somente um período.

IPER	IND	TIPO	NUM	Entidade Nome	Unid	Valor I	Valor F	variacao ABS	(%)
2	43	VERTIMENTO	8	ESTREITO	m3/s	225.71	0.00	-225.71	100.0
2	44	VERTIMENTO	12	P. COLOMBIA	m3/s	244.60	0.00	-244.60	100.0
2	45	VERTIMENTO	17	MARIMBONDO	m3/s	418.00	0.00	-418.00	100.0
2	46	VERTIMENTO	31	ITUMBIARA	m3/s	261.00	0.00	-261.00	100.0
2	47	VERTIMENTO	30	CORUMBA I	m3/s	74.00	0.00	-74.00	100.0
2	48	VERTIMENTO	251	SERRA MESA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	49	VERTIMENTO	278	MANSO	m3/s	44.00	0.00	-44.00	100.0
2	50	VERTIMENTO	123	FUNIL	m3/s	66.04	0.00	-66.04	100.0
2	51	VERTIMENTO	257	PEIXE ANGIC	m3/s	187.98	0.00	-187.98	100.0
2	52	VERTIMENTO	122	SANTA BRANCA	m3/s	23.00	0.00	-23.00	100.0
2	53	VERTIMENTO	124	LAJES	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	54	VERTIMENTO	130	ILHA POMBOS	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	55	VERTIMENTO	125	STA CECILIA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	56	VERTIMENTO	180	TOCOS	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	57	VERTIMENTO	181	SANTANA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	58	VERTIMENTO	107	EDGARD SOUZA	m3/s	165.57	237.00	71.43	43.1
2	59	VERTIMENTO	117	GUARAPIRANGA	m3/s	40.00	40.00	0.00	0.0
2	60	VERTIMENTO	118	BILLINGS	m3/s	60.00	60.00	0.00	0.0
2	61	VERTIMENTO	32	CACH.DOURADA	m3/s	270.48	0.00	-270.48	100.0
2	62	VERTIMENTO	139	CANDONGA	m3/s	42.82	0.00	-42.82	100.0
2	63	VERTIMENTO	144	MASCARENHAS	m3/s	218.87	0.00	-218.87	100.0
2	64	VERTIMENTO	66	ITAIPU	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	65	VERTIMENTO	110	ERNESTINA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	66	VERTIMENTO	111	PASSO REAL	m3/s	12.00	301.44	289.44	*****
2	67	VERTIMENTO	112	JACUI	m3/s	16.01	294.79	278.78	*****
2	68	VERTIMENTO	113	ITAUBA	m3/s	15.00	0.00	-15.00	100.0
2	69	VERTIMENTO	114	D. FRANCISCA	m3/s	20.94	0.00	-20.94	100.0
2	70	VERTIMENTO	74	G.B. MUNHOZ	m3/s	80.00	0.00	-80.00	100.0
2	71	VERTIMENTO	76	SEGREDO	m3/s	94.00	0.00	-94.00	100.0
2	72	VERTIMENTO	82	SALTO CAXIAS	m3/s	280.00	0.00	-280.00	100.0
2	73	VERTIMENTO	115	G.P. SOUZA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	74	VERTIMENTO	73	JORDAO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	75	VERTIMENTO	71	STA CLARA PR	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0
2	76	VERTIMENTO	72	FUNDAO	m3/s	14.00	0.00	-14.00	100.0
2	77	VERTIMENTO	77	SLT.SANTIAGO	m3/s	114.79	0.00	-114.79	100.0

Figura 6.12 - Variações no vertimento ocorridas em algumas usinas, com um valor de penalidade igual a zero.

Relatório Técnico – 1004 / 11

IPER	IND	TIPO	NUM	Entidade		Unid	Valor I	Valor F	variacao	
				Nome					Abs	(%)
2	43	VERTIMENTO	8	ESTREITO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	44	VERTIMENTO	12	P. COLOMBIA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	45	VERTIMENTO	17	MARIMBONDO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	46	VERTIMENTO	31	ITUMBIARA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	47	VERTIMENTO	30	CORUMBA I	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	48	VERTIMENTO	251	SERRA MESA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	49	VERTIMENTO	278	MANSO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	50	VERTIMENTO	123	FUNIL	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	51	VERTIMENTO	257	PEIXE ANGIC	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	52	VERTIMENTO	122	SANTA BRANCA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	53	VERTIMENTO	124	LAJES	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	54	VERTIMENTO	130	ILHA POMBOS	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	55	VERTIMENTO	125	STA CECILIA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	56	VERTIMENTO	180	TOCOS	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	57	VERTIMENTO	181	SANTANA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	58	VERTIMENTO	107	EDGARD SOUZA	m3/s	165.57	237.00	71.43	43.1	
2	59	VERTIMENTO	117	GUARAPIRANGA	m3/s	40.00	40.00	0.00	0.0	
2	60	VERTIMENTO	118	BILLINGS	m3/s	60.00	60.00	0.00	0.0	
2	61	VERTIMENTO	32	CACH.DOURADA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	62	VERTIMENTO	139	CANDONGA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	63	VERTIMENTO	144	MASCARENHAS	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	64	VERTIMENTO	66	ITAIPU	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	65	VERTIMENTO	110	ERNESTINA	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	66	VERTIMENTO	111	PASSO REAL	m3/s	185.55	185.55	0.00	0.0	
2	67	VERTIMENTO	112	JACUI	m3/s	189.56	189.56	0.00	0.0	
2	68	VERTIMENTO	113	ITAUBA	m3/s	14.34	14.34	0.00	0.0	
2	69	VERTIMENTO	114	D. FRANCISCA	m3/s	20.04	20.04	0.00	0.0	
2	70	VERTIMENTO	74	G.B. MUNHOZ	m3/s	78.90	0.00	-78.90	100.0	
2	71	VERTIMENTO	76	SEGredo	m3/s	74.23	0.00	-74.23	100.0	
2	72	VERTIMENTO	82	SALTO CAXIAS	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	73	VERTIMENTO	115	G.P. SOUZA	m3/s	7.00	0.00	-7.00	100.0	
2	74	VERTIMENTO	73	JORDAO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	75	VERTIMENTO	71	STA CLARA PR	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	76	VERTIMENTO	72	FUNDAO	m3/s	0.00	0.00	0.00	0.0	
2	77	VERTIMENTO	77	SLT.SANTIAGO	m3/s	111.19	0.00	-111.19	100.0	

Figura 6.13 - Variações no vertimento das mesmas usinas mostradas na Figura 6.12, quando se utiliza um valor de penalidade igual a 0,1 R\$/(hm<sup>3</sup>/h)

Para ter uma idéia mais global do impacto da penalidade de variação de vertimento, executou-se o caso com penalidades de zero; 0.01; 0.1 e 100.0 R\$/(hm<sup>3</sup>/h), e calculou-se o valor total, em m<sup>3</sup>/s, de variações de vertimento ocorridas em todas as usinas e períodos. A Tabela 6.3 mostra esses resultados, além do custo total de operação obtido em cada execução.

Tabela 6.3 - Comparação das variações totais de vertimento e custo de operação, ao se variar o valor da penalidade interna de variação de vertimento.

Valor de penalidade	Valor total de variações de vertimento ((m <sup>3</sup> /s)/h)	Custo total de operação (1000R\$)
zero	40.303.120,0	56.720,50
0,01	40.303.121,1	1802,49
0,10	40.303.128,1	1362,85

100,0	40.306.646,5	450,51
-------	--------------	--------

É interessante observar que a sinalização mínima de que se “deseja” evitar variações de vertimento feita ao se adotar um valor de penalidade de 0,01 é suficiente para que o modelo reduza drasticamente essas variações ao longo do estudo, sem que houvesse aumento sensível no custo de operação do sistema (o aumento de custo foi de apenas  $1,1 \times 1000R\$$ ). A partir do uso de penalidades da ordem de  $0,1 R\$/hm^3$ , o custo de operação começa a subir de maneira mais sensível, e não se consegue mais uma redução tão drástica nas variações de vertimentos. A utilização de uma penalidade de  $100 R\$(hm^3/h)$  é apenas ilustrativa, pois é evidente que não se pode aplicar um valor tão alto para um custo que é apenas fictício.

Verificou-se ainda que a penalidade de  $0,01 R\$/hm^3$  não impacta os custo marginais médios de operação por subsistema para a semana 1, como mostra os resultados da Tabela 6.4.

**Tabela 6.4 - Custos marginais médios de operação por subsistema para a semana 1, ao se utilizar ou não a penalidade para variação de vertimento.**

Subsistema	Custo marginal de operação (R\$/MWh)	
	Penalidade = zero	Penalidade = 0,01
SE	32,52	32,52
S	32,52	32,52
NE	50,37	50,37
N	32,51	32,51

### 6.7. Tempo Computacional

A Tabela 6.5 e a Tabela 6.6 mostram uma comparação entre os tempos de execução ao se utilizar ou não as restrições “hard” e “soft” para vertimento, respectivamente. Os resultados sugerem que essas restrições não causam grande impacto no tempo para resolução dos problemas de simulação e otimização. Entretanto, para se avaliar melhor essa questão, são necessários estudos mais aprofundados com um conjunto maior de casos.

**Tabela 6.5 - Comparação entre os tempos de execução com e sem restrições “hard” de limite e variação de vertimento .**



	Adoção de restrições “hard” de limite e de variação de vertimento	
	Não	Sim
Tempo total de execução (simulação + otimização (min:seg))	01:12	01:03

**Tabela 6.6 - Comparação entre os tempos de execução com e sem restrições “soft” de variação de vertimento .**

	Adoção de restrições “soft” de limite de variação	
	Não	Sim
Tempo total de execução (simulação + otimização (min:seg))	00:47	00:56

---

## **7. CONCLUSÕES**

Este relatório teve por objetivo descrever a modelagem das variáveis de vertimento e desvio das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, em especial os módulos SIMHIDR e DESSEM-PAT. Detalhou-se como são representados alguns aspectos importantes associados a essas variáveis, como a restrição da cota de soleira de vertedouro / desvio, os valores máximos para o vertimento/desvio e as variações horárias nos valores dessas variáveis.

Os resultados apresentados para o estudo de caso realizado com o sistema elétrico brasileiro sugerem que é possível controlar o comportamento indesejável do vertimento ao longo do horizonte de estudo – valores muito elevados em alguns períodos e grandes variações entre períodos consecutivos – introduzindo-se restrições “soft” de limite de variação da vazão vertida. Estas restrições não impactam de forma sensível a operação do sistema em termos econômicos. Pode-se também incluir restrições “hard” de limite e de variação para a vazão vertida/desviada, as quais também ajudam a evitar valores muito extremos para essas variáveis, e que, se não forem muito rigorosas, resultam em um acréscimo pequeno no custo de operação do sistema.

---

## **8. REFERÊNCIAS**

- [1] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual do Usuário – Modelo DESSEM-PAT, versão 7.0”, Janeiro 2011
- [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 do enchimento de volume morto nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Abril 2010.
- [5] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual de Referência do Modelo DESSEM –GTRD”, Relatório Técnico CEPEL, Julho 2003
- [6] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Realização de etapa de pré-processamento no modelo DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Janeiro 2011
- [7] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Restrições de vertimento máximo em usinas hidroelétricas”, Relatório Técnico CEPEL DPP/PEN 097/2000, Fevereiro 2000.
- [8] .CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Consideração da Evaporação nos Reservatórios nos Modelos SIMHIDR E DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Abril 2010.