

RELATÓRIO TÉCNICO

Nº: DP/DEA – 15010/10 Nº DE PÁGINAS: 33 ANEXOS: -

TÍTULO: CONSIDERAÇÃO DA EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS 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 da evaporação das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, em particular os módulos SIMHIDR e DESSEM-PAT. A metodologia consiste em representar a vazão evaporada como função linear do volume armazenado das usinas, o que permite uma modelagem da consideração da evaporação de forma exata do ponto de vista matemático. Os resultados mostram uma elevada acurácia do modelo, com desvios desprezíveis em relação aos valores exatos de evaporação obtidos diretamente através dos polinômios não lineares volume x cota e cota x área.

<p>AUTORES:</p> <p>Michel Igor de Almeida Ennes - CEPEL André Luiz Diniz Souto Lima – CEPEL Tiago Norbiato dos Santos – PUC-RJ</p>	<p>PALAVRAS-CHAVE:</p> <p>Programação diária da operação, simulação hidráulica, programação linear, evaporação.</p> <p>CLASSIFICAÇÃO: CONTROLADO</p>
---	--

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

APROVAÇÃO



DIRETOR DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO
ROBERTO PEREIRA CALDAS

24/05/10

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Projeto DESSEM

Relatório Técnico:

**CONSIDERAÇÃO DA EVAPORAÇÃO NOS
RESERVATÓRIOS NOS MODELOS SIMHIDR E
DESSEM-PAT**

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	6
2. CONCEITUAÇÃO DA EVAPORAÇÃO.....	8
2.1. Representação do reservatório da usina.....	8
2.2. Cálculo da cota de montante da usina.....	9
2.3. Cálculo da área do espelho d'água.....	10
2.4. Cálculo da vazão de evaporação	11
2.5. Evaporação como função do volume armazenado.....	12
2.6. Considerações adicionais	12
2.6.1 Usinas com enchimento de volume morto	12
3. DADOS DE EVAPORAÇÃO NOS MODELOS.....	14
3.1. Leitura de Dados	14
3.2. Validação dos Dados.....	14
4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DA EVAPORAÇÃO	15
4.1. Modelo linear para a evaporação	18
4.1.1 Cálculo da derivada k_{EVAP} para aproximação da evaporação	18
4.1.2 Utilização do volume útil médio no período.....	19
4.1.3 Definição do volume de referência V_{ref}	19
4.1.4 Variável de folga para a evaporação	20
4.1.5 Expressão final para a restrição.....	21
4.2. Termos adicionais nos cortes de Benders da PDD	22
4.3. Avaliação da acurácia na aproximação.....	22
5. RELATÓRIOS DE SAÍDA	23
6. ESTUDO DE CASO.....	24
6.1. Dados gerais do estudo	24
6.2. Dados de evaporação	25
6.3. Resolução do problema.....	25
6.4. Relatórios de evaporação	27
6.4.1 Relatório com os dados de entrada para a evaporação (ECO_EVAP.XXX)	27
6.4.2 Relatório com os dados da modelagem da evaporação (AVL_EVAPLIN_YYY.XXX).....	27
6.4.3 Relatórios de avaliação da acurácia da modelagem linear para a evaporação (YYY_EVAP.XXX)	29
6.5. Tempo Computacional.....	30
7. CONCLUSÕES	32
8. REFERÊNCIAS	33

Siglas e Nomenclatura

ONS:	Operador Nacional do Sistema Elétrico
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:

- $A_{esp}(\cdot)$: área do espelho d'água do reservatório, como função de sua cota de montante;
- $a_{aci}, i = 1, \dots, 4$: coeficiente de h_{mon}^i no polinômio área-cota da usina hidrelétrica;
- $a_{cvi}, i = 1, \dots, 4$: coeficiente de V_{tot}^i no polinômio cota-volume da usina hidrelétrica;
- $c_{evap_{i,j}}$: coeficiente de evaporação da usina i , no mês j ;
- $Evap_i^t$: evaporação da usina hidrelétrica i , no instante t ;
- $f_{EVAP_i}^t$: variável de folga para o atendimento à evaporação, para a usina i , no instante t ;
- GH_i^t : Geração da usina hidrelétrica i , no instante t ;
- $h_{mon}(\cdot)$: cota do reservatório, como função do volume armazenado total;
- I_i^t : vazão incremental natural à usina hidrelétrica i , no instante t ;
- k_{EVAP} : derivada da equação de aproximação para a evaporação;
- M_i : Conjunto de usinas à montante da usina i ;
- Q_i^t : turbinamento da usina hidrelétrica i , no instante t ;
- S_i^t : vertimento da usina hidrelétrica i , no instante t ;
- τ_{ji} : tempo de viagem da água entre as usinas j e i ;
- V_i^t : volume armazenado da usina hidrelétrica 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 evaporação das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM. A metodologia consiste em representar a vazão evaporada como função linear do volume armazenado das usinas, o que permite uma modelagem da consideração da evaporação de forma exata do ponto de vista matemático. Os resultados mostram uma elevada acurácia do modelo, com desvios desprezíveis em relação aos valores exatos de evaporação obtidos diretamente através dos polinômios não lineares volume x cota e cota x área.

O relatório está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2, faz-se uma descrição conceitual da evaporação; 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 DA EVAPORAÇÃO

Todos os reservatórios, sejam de regularização ou a fio d'água, podem apresentar evaporação. A perda de água por evaporação é função da área do espelho d'água do reservatório (m^2) e do coeficiente de evaporação, expresso em $mm/mês$, o qual varia de acordo com a época do ano. Após uma conversão de unidades, obtém-se uma vazão de evaporação, em m^3/s , que deve ser considerada como uma retirada (forçada) de água do reservatório nos modelos de planejamento e programação da operação.

A área do espelho d'água é função da cota de montante do reservatório, a qual, por sua vez, é função do volume armazenado nos reservatórios. Portanto, é preciso derivar uma expressão que, para cada época do ano (mês), forneça a vazão de evaporação (m^3/s) no reservatório em função de seu volume armazenado (hm^3). As etapas para obtenção desta função, descritas ao longo desta seção, são:

- determinação da cota de montante da usina em função do volume armazenado (seção 2.2);
- determinação da área do espelho d'água da usina em função da cota de montante (seção 2.3);
- determinação da vazão evaporada em função da área do espelho d'água (seção 2.4).

2.1. Representação do reservatório da usina

O armazenamento de um reservatório pode ser expresso por uma dessas duas variáveis:

- **Volume total:** é o volume total armazenado no reservatório, incluindo o volume morto;
- **Volume útil:** uma vez em operação, a usina sempre irá operar com um armazenamento superior ao volume morto. Portanto, nos modelos de planejamento, é conveniente denominar o volume morto máximo de volume mínimo (V_{min}) e representar o armazenamento no reservatório como a diferença entre o volume armazenado e o volume morto máximo, a qual passa a ser denominada de volume útil (V_{util}):

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

Como a cota de montante do reservatório é sempre crescente com o volume armazenado, para cada valor de V_{util} irá corresponder somente uma cota para o nível d'água no reservatório, a qual é denominada de “cota de montante”¹ (h_{mon}), e medida em relação ao nível do mar.

A Figura 2.1 ilustra a relação entre todas as variáveis associadas ao armazenamento dos reservatórios.

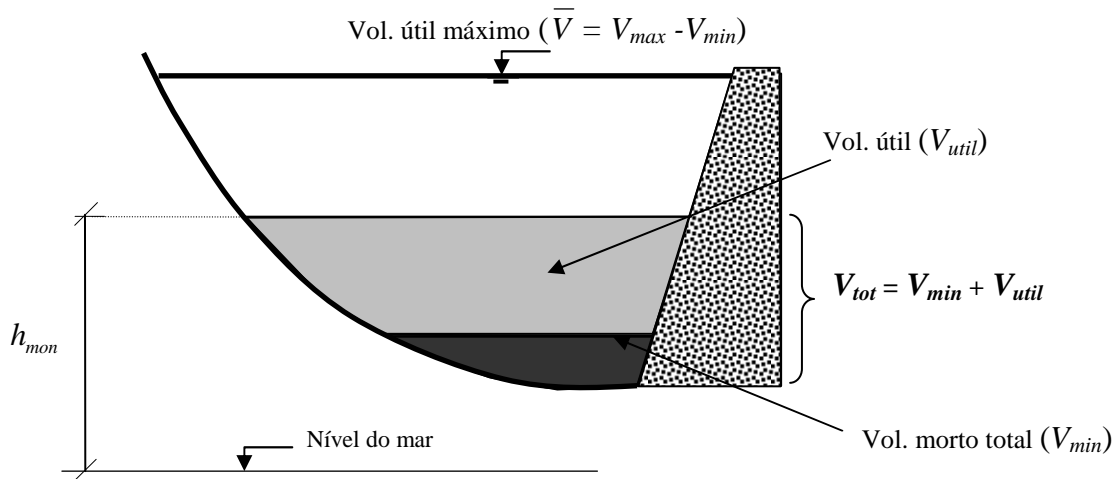


Figura 2.1 -Relação entre as variáveis que representam o volume armazenado nos reservatórios.

Uma descrição detalhada dos reservatórios das usinas hidroelétricas e dos estados operativos de uma usina hidroelétrica é feita em [4].

2.2. Cálculo da cota de montante da usina

A relação entre a cota do reservatório da usina (h_{mon}) e o seu volume armazenado total (V_{tot}) é dada pelo “polinômio cota-volume” da usina (ou polinômio de montante), que corresponde a um polinômio de grau 4, como mostrado a seguir:

$$h_{mon}(V_{tot}) = a_{cv0} + a_{cv1}V_{tot} + a_{cv2}V_{tot}^2 + a_{cv3}V_{tot}^3 + a_{cv4}V_{tot}^4, \quad (2.2)$$

onde a_{cvi} corresponde ao coeficiente de V_{tot}^i .

Cada usina hidroelétrica possui o seu próprio polinômio, que consta no arquivo de cadastro das usinas hidroelétricas (vide [1]). A Figura 2.2 exemplifica esse polinômio, para a usina de Tucuruí.

¹ a cota de jusante é a cota do canal de fuga do reservatório.

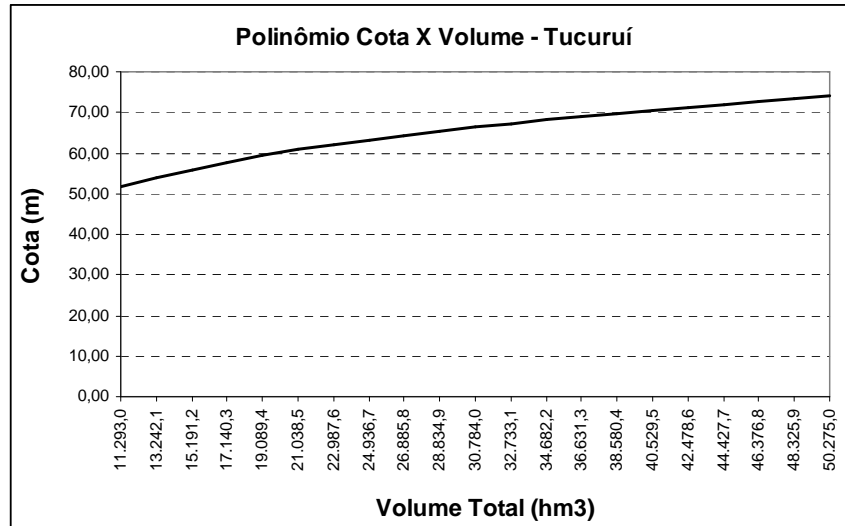


Figura 2.2 – Polinômio volume-cota para a usina de Tucuruí (cadastro das usinas - Abr/09).

É importante ressaltar que o argumento do polinômio é o **volume total** da usina. Portanto, uma vez conhecido o volume útil da usina (em hm^3 ou %), deve-se fazer a conversão apropriada de V_{util} para V_{tot} , antes de se utilizar o polinômio:

$$V_{tot} (hm^3) = V_{min} + V_{util} (hm^3), \quad \text{ou} \quad (2.3)$$

$$V_{tot} (hm^3) = V_{min} + \left(\frac{V_{util} (\%)}{100} \right) \times (V_{max} - V_{min}),$$

onde os valores de V_{min} e V_{max} estão em hm^3 .

2.3. Cálculo da área do espelho d'água

Uma vez obtida a cota do reservatório a partir do seu volume armazenado (através do polinômio cota-volume (seção 2.2)), pode-se obter a área do espelho d'água em função da cota do reservatório.

Como a área do espelho d'água é sempre crescente com o a cota do reservatório, para cada valor de h_{mon} irá corresponder somente uma área para o espelho d'água, que será denotada por A_{esp} . A função que fornece o valor de A_{esp} em função de h_{mon} é um polinômio de quarto grau, como segue:

$$A_{esp} (h_{mon}) = a_{ac0} + a_{ac1} h_{mon} + a_{ac2} h_{mon}^2 + a_{ac3} h_{mon}^3 + a_{ac4} h_{mon}^4, \quad (2.4)$$

onde h_{mon} é dado em m e A_{esp} em km^2 .

Os dados desse polinômio para cada usina também constam do cadastro de usinas hidroelétricas. A Figura 2.3 exemplifica esta função para a usina de Sobradinho.

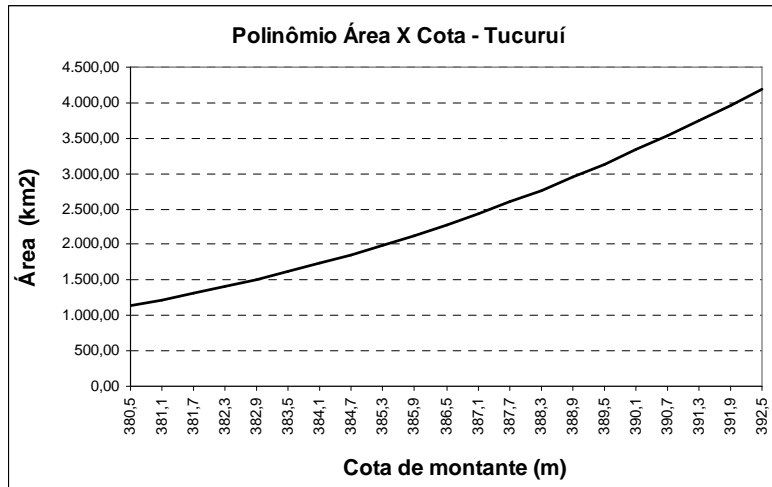


Figura 2.3 - Polinômio área-cota para a usina de Sobradinho (cadastro das usinas -Abr/09).

2.4. Cálculo da vazão de evaporação

Para um dado valor de volume armazenado, a vazão evaporada é calculada pelo produto entre o coeficiente de evaporação mensal da usina (que também consta do cadastro de usinas hidroelétricas) e da área do espelho d'água (km^2), calculada na seção 2.3. Aplicando-se ainda um fator de conversão de unidades, a fim de expressar a evaporação em m^3/s , obtêm-se a seguinte expressão:

$$Q_{evap} (A_{esp}) = \frac{1}{3,6NH_{mês}} \times c_{evap\ mês} \times A_{esp} \quad (2.5)$$

(m^3 / s) $(mm / mês)$ (km^2)

onde $NH_{mês}$ corresponde ao número de horas no mês em questão. A Tabela 2.1 exemplifica o cálculo da vazão evaporada para diversas condições do reservatório de Sobradinho, em diferentes épocas do ano.

Tabela 2.1 - Exemplos de cálculos de vazão evaporada para a usina de Sobradinho, para diversas condições do reservatório e período do ano.

Mês	Volume (% v.útil)	Cota Montante (m)	Área espelho d'água (km^2)	C_{evap} (mm/mês)	Q_{evap} (m^3/s)
Janeiro	80%	390,946	3621,586	171	231,22
Março	70%	390,132	3342,911	61	76,13
Julho	30%	386,071	2174,342	165	133,95
Agosto	20%	384,572	1833,447	203	138,96
Novembro	50%	388,353	2785,947	245	263,33

2.5. Evaporação como função do volume armazenado

Tendo em vista as expressões apresentadas nas seções anteriores, pode-se determinar uma expressão para a relação direta entre a vazão evaporada Q_{evap} e o volume armazenado $V_{tot_i}^t$ em um reservatório i , ao longo de um período do tempo t correspondente ao mês j :

$$Q_{evap}(V_{tot_i}^t) = \frac{1}{3,6NHmês_j} c_{evap,i,j} A_{esp}(h_{mon}(V_{tot_i}^t)), \quad (2.6)$$

onde as funções $A_{esp}(\cdot)$ e $h_{mon}(\cdot)$ são dadas, respectivamente, por (2.4) e (2.2).

A seguir, mostra-se na Figura 2.4 um exemplo do gráfico da vazão evaporada (m^3/s) em função do volume total armazenado (hm^3) do reservatório, para a usina de Sobradinho.

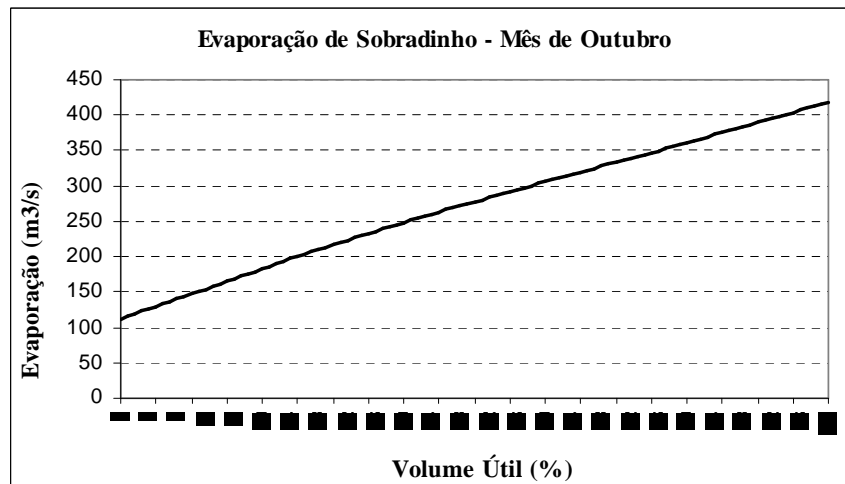


Figura 2.4 – Relação entre a vazão evaporada e o volume do reservatório de Sobradinho, para o mês de Outubro, que é o de maior coeficiente de evaporação ($267 m^3/s$).

2.6. Considerações adicionais

2.6.1 Usinas com enchimento de volume morto

Apesar de se utilizar o valor de volume total no polinômio cota-volume das usinas hidroelétricas, o polinômio área-cota só está ajustado para o intervalo de volume correspondente ao volume útil da usina, ou seja, entre os valores de volume total entre 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 [4], já que não se dispõem dos valores de espelho d'água correspondentes a valores de volume inferiores a V_{min} .

Como exemplo, considera-se a usina de Curua-Una, cujos dados dos polinômios área-cota e cota-volume estão reproduzidos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Dados dos polinômios para a usina de Curua-Uma.

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Cota-volume	5,861240E+1	1,79579E-2	4,96098E-6	-1,51388E-8	9,25201E-12
Área-cota	-5,29830E+2	9,34808E+0	-6,02056E-3	0,00000E+00	0,00000E+00

Os volumes mínimo e máximo dessa usina são 130 e 530 hm^3 , respectivamente. Aplicando-se em seqüência as expressões (2.2) e (2.4) para um volume morto de 10 hm^3 , obtêm-se os valores de 58,792m e -1,0436 km^2 para a cota e a área do reservatório, respectivamente. Portanto, o valor negativo para a área do reservatório indica que esses polinômios não estão ajustados para valores de volume total inferiores ao volume mínimo, que caracterizam uma situação de enchimento de volume morto.

3. DADOS DE EVAPORAÇÃO NOS MODELOS

Para se representar a evaporação nas usinas hidroelétrica, não é necessário informar explicitamente nenhum dado referente à evaporação, uma vez que os coeficientes mensais de evaporação e todos os dados físicos dos reservatórios que impactam no cálculo da vazão evaporada são fornecidos no cadastro de usinas hidroelétricas. No entanto, caso seja necessário, esses valores podem ser alterados através dos registros AC do arquivo ENTDAADOS.XXX.

O único dado que o usuário necessita informar é o *flag* que indica se a evaporação deve ser considerada, individualmente para cada usina hidroelétrica. Essa informação é fornecida nos registros UH, e vale tanto para o horizonte de simulação como de otimização.

3.1. Leitura de Dados

Os dados específicos para representação da evaporação em 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 da evaporação nas usinas hidroelétricas

Dado	Notação	Localização
<i>Flag</i> indicativo de consideração ou não da evaporação	-	Registro UH do arquivo ENTDAADOS.XXX

3.2. Validação dos Dados

Não há nenhuma validação especial nos dados de evaporação, já que os dados das usinas hidroelétricas constam no cadastro. Portanto, validam-se apenas os valores informados nos registros AC, em caso de alteração desses valores cadastrais.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DA EVAPORAÇÃO

A evaporação corresponde a uma perda de água nos reservatórios. Desta forma, o volume evaporado $Evap_i^t$ na usina hidroelétrica i ao longo do instante t deve ser considerado como uma retirada de água na equação de balanço hídrico da usina no próprio instante t , conforme mostrado abaixo:

$$V_i^t + Q_i^t + S_i^t - \sum_{j \in M_i} (Q_j^{t-\tau_{ji}} + S_j^{t-\tau_{ji}}) = V_i^{t-1} + I_i^t - Evap_i^t, \quad (4.1)$$

onde Q_i^t e S_i^t correspondem, respectivamente, ao turbinamento e vertimento da usina hidroelétrica i no período t ; V_i^t é o volume armazenado ao final do período t ; I_i^t corresponde à vazão incremental natural à usina hidroelétrica; M_i é o conjunto de usinas à montante da usina i ; e τ_{ji} é o tempo de viagem da água entre cada par de usinas j e i .

Os modelos do projeto DESSEM representam as restrições das usinas hidroelétricas por meio de programação linear (PL)¹. Entretanto, a expressão (2.6), que relaciona a evaporação $Evap_i^t$ ao volume armazenado V_i^t , não pode ser introduzida de forma exata em um PL, pois envolve relações não lineares. Desta forma, deve-se buscar uma forma alternativa de representar a evaporação, que torne possível a sua inserção em um problema de programação linear, sem que haja perda significativa de acurácia em relação à expressão real não linear.

A seguir, descreve-se sucintamente a forma de modelagem da evaporação que vigorou nos modelos até Março 2010. Esta alternativa foi abandonada devido à imprecisão matemática que existia quando se resolvia o problema multi-estágio por Programação Dinâmica Dual. A estratégia definitiva, adotada nos modelos a partir da publicação deste Relatório Técnico, é descrita com detalhes a partir da seção 4.1.

¹ O modelo DESSEM-UC resolve um problema de programação não linear e inteira, entretanto as restrições das usinas hidroelétricas compõem um subproblema de programação linear.

Estratégia adotada anteriormente: cálculo “por-fora” da evaporação

Devido à impossibilidade de se representar a restrição (2.6) no PL, uma primeira abordagem experimentada para a modelagem da evaporação consistia nos seguintes passos:

- antes de se resolver o PL de cada período t , calculava-se a vazão de evaporação no reservatório através da expressão exata (2.6), com base no volume V_{toti}^{t-1} no início do período t , o qual é um resultado da resolução do subproblema para o período $t-1$ ¹;
- subtraía-se do termo independente (“RHS”) da equação de balanço hídrico do período t o volume evaporado correspondente a essa vazão, levando-se em consideração a duração do intervalo t ;
- resolvia-se então o subproblema de PL do período t sem considerar a evaporação no PL, uma vez que ela já foi descontada “por fora”.

No entanto, essa abordagem apresenta algumas deficiências, tais como:

- a evaporação no período t foi calculada com base apenas no volume armazenado no **início** do período. Portanto, caso houvesse uma variação razoável no volume armazenado ao longo do período, o volume evaporado (que teria sido calculado a princípio de forma “exata”) poderia se desviar do valor real que seria obtido caso tivesse sido utilizado o volume médio no período. Embora no problema de PDO não haja grandes variações de volume ao longo de um período por estes serem muito curtos (algumas horas), essa abordagem perde acurácia na medida em que se consideram períodos de tempo maiores, ou quando há reservatórios com pequeno volume de regularização porém com grandes variações na área do espelho d’água;
- quando se resolve o problema por programação dinâmica dual (PDD, vide [1]), o volume armazenado de uma usina no início de um período pode variar de uma iteração para a outra, acarretando valores diferentes de desconto de evaporação na equação de balanço hídrico. Desta forma, estamos resolvendo “problemas de otimização diferentes” a cada iteração, o que pode levar a alguns problemas, tais

¹ Pode-se também considerar toda ou uma parcela da vazão afluente à usina no período t na determinação do volume de referência para o cálculo da evaporação.

como *gap* negativo ou *gaps* disjuntos (para maiores detalhes, consulte a documentação metodológica do modelo);

- quando se resolve o problema por meio da estratégia de agregação de vários períodos em um mesmo estágio [5], um mesmo PL pode conter as restrições de mais de um período. Assim, a evaporação em um período t deve ser calculada com base no volume armazenado no início do primeiro período (t') correspondente ao estágio onde se situa o período t . Portanto, na medida em que se utilizam fatores maiores de agregação, pode haver um distanciamento grande entre t e t' , o que acarretaria uma perda maior de precisão no cálculo da evaporação para o período t . Por exemplo, na situação limite em que se resolve o problema para a semana toda como um PL único, a evaporação de todos os períodos seria calculada com base no volume armazenado no início da semana.

Observando-se o gráfico da Figura 2.4, verifica-se que, apesar dos polinômios cota-volume (2.2) e área-cota (2.4) serem de quarto grau, a expressão final da vazão evaporada em relação ao volume armazenado (2.6) é praticamente linear. Portanto, em virtude da boa aproximação esperada para um modelo linear, e pelos inconvenientes causados pela alternativa de cálculo “por fora” da evaporação, essa alternativa preliminar foi abandonada.

Passou-se então a adotar um modelo linear para a evaporação, que consiste em dois procedimentos principais:

- incluir a evaporação explicitamente como uma variável do PL;
- representar a evaporação como função linear do volume armazenado no reservatório, o qual também é uma variável do PL.

Com isso, evitam-se os inconvenientes do cálculo “por fora” da evaporação, e pode-se representá-la como função não do volume no início do estágio correspondente ao período t , mas do próprio volume médio no período t , já que ambos os volumes V_i^t e V_i^{t-1} estão representados no PL.

A seção 4.1 a seguir detalha a construção do modelo linear para a evaporação. Caso seja utilizada a estratégia de PDD para resolver o problema, é necessário incluir um termo adicional nos cortes da função de custo futuro (FCF), o qual é descrito na seção 4.2.

Finalmente, a seção 4.3 descreve como se pode verificar a acurácia dessa modelagem, o que garante um controle em relação à precisão obtida pelo modelo.

4.1. Modelo linear para a evaporação

Na exposição que segue, considera-se o cálculo para uma usina hidroelétrica i em um determinado período de tempo t , cuja duração vale Δt .

Como mencionado anteriormente, a função $Evap(V_{tot})$ (eq. (2.6)) fornece a evaporação como função do volume armazenado total do reservatório. O modelo proposta para representação da evaporação consiste em realizar uma aproximação linear dessa função, em torno de um valor de referência V_{ref} , conforme mostra a Figura 4.2 a seguir:

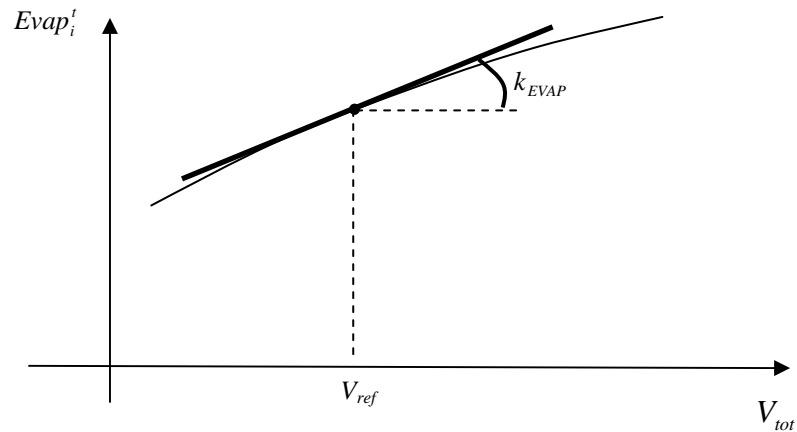


Figura 4.2 - Aproximação linear da evaporação em função do volume armazenado, em torno de um volume de referência V_{ref} .

A variável de evaporação $Evap_i^t$ será aproximada então da seguinte forma:

$$\begin{aligned} Evap(V_{tot}) &= Evap(V_{ref}) + k_{EVAP}(V_{tot} - V_{ref}) = \\ &= [Evap(V_{ref}) - k_{EVAP}V_{ref}] + k_{EVAP} V_{tot} , \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde o primeiro termo à direita se torna um valor numérico (conhecido), e o fator k_{EVAP} corresponde à derivada da função $Evap(V_{tot})$ no ponto $V_{tot} = V_{ref}$.

Para se utilizar a expressão (4.2) no PL, são necessários dois procedimentos: calcular o valor de k_{EVAP} e representar o volume total como função do volume útil médio no período. Esses dois aspectos são detalhados a seguir.

4.1.1 Cálculo da derivada k_{EVAP} para aproximação da evaporação

Derivando-se a expressão (2.6) em relação à V_{tot} , obtém-se a derivada k_{EVAP} da vazão evaporada em relação ao volume armazenado, no ponto $V = V_{ref}$, conforme mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} k_{EVAP} &= \frac{\partial Evap}{\partial V_{tot}}(V_{ref}) = \frac{c_{evap}}{3,6NHmes} \frac{\partial A_{esp}}{\partial h_{mon}}(h_{mon}(V_{ref})) \frac{\partial h_{mon}}{\partial V_{tot}}(V_{ref}) = \\ &= \frac{c_{evap}}{3,6NHmes} \left[a_{ac1} + 2a_{ac2}h_{mon}(V_{ref}) + 3a_{ac3}h_{mon}^2(V_{ref}) + 4a_{ac4}h_{mon}^3(V_{ref}) \right] \\ &\quad \left[a_{cv1} + 2a_{cv2}V_{ref} + 3a_{cv3}V_{ref}^2 + 4a_{cv4}V_{ref}^3 \right], \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde k_{EVAP} é dado em $(m^3/s) / hm^3$.

4.1.2 Utilização do volume útil médio no período

Na expressão final de (4.2), deseja-se utilizar como valor de V_{tot} o volume útil total médio no período t . Portanto, deve-se expressar o volume médio como a média aritmética entre os volumes no início e final do período. Além disso, deve-se transformar o volume total em volume útil, uma vez que no PL os armazenamentos são representados através do volume útil, e não do volume total. Com essas modificações, obtém-se a seguinte expressão para a aproximação da vazão evaporada:

$$\begin{aligned} Evap_i^t &= [Evap(V_{ref}) - k_{EVAP}V_{ref}] + k_{EVAP} \left[V_{min} + \left(\frac{V_i^t + V_i^{t-1}}{2} \right) \right] = \\ &= [Evap(V_{ref}) + k_{EVAP}(V_{min} - V_{ref})] + \left(\frac{k_{EVAP}}{2} \right) V_i^t + \left(\frac{k_{EVAP}}{2} \right) V_i^{t-1}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde $Evap_i^t$, V_i^t e V_i^{t-1} são variáveis do PL.

4.1.3 Definição do volume de referência V_{ref}

Em princípio, o valor de referência V_{ref} deveria ser o mais próximo possível do ponto de operação da usina no período em questão. Em relação à definição desse valor, algumas alternativas podem ser consideradas:

- utilizar o mesmo valor para todos os períodos, e igual ao volume da usina no início do horizonte de simulação ou otimização;
- utilizar um valor variável por período, que pode ser obtido a partir dos resultados de uma resolução anterior do problema.

Para o horizonte de otimização, pode-se utilizar, nesta segunda alternativa, o volume inicial obtido após k iterações preliminares da PDD, que seriam realizadas para se conhecer a “tendência” de operação do sistema para o caso em estudo¹. De qualquer forma, ressalta-se que o modelo linear da evaporação já tem a vantagem de considerar a evaporação como função do volume armazenado, enquanto na representação antiga a evaporação era calculada por fora, antes de se resolver o PL.

Como não se esperam grandes variações de volume no reservatório ao longo de uma ou duas semanas, a utilização do volume no início do horizonte para o valor de V_{ref} deve ser suficiente para promover a precisão desejada na modelagem da evaporação, como será verificado nos resultados de acurácia mostrados na seção 6.4.3.

4.1.4 Variável de folga para a evaporação

É possível que as restrições físicas e operativas impostas para uma usina hidroelétrica inviabilizem a retirada de água para evaporação. Assim, para evitar que o pacote reporte um PL inviável causando a interrupção do programa, insere-se uma variável de folga na restrição de evaporação, a qual, quando ativada, indicará que a evaporação não foi atendida².

Limite superior da variável de folga

O valor de violação da evaporação não pode ser superior à vazão que seria evaporada para as condições correntes de volume do reservatório. Entretanto, não se conhece, antes de se executar o modelo, qual seria a vazão de evaporação. Como uma aproximação, considera-se como limite superior para a variável de folga a evaporação correspondente ao volume de referência V_{ref} utilizado no cálculo da aproximação linear para a evaporação, conforme descrito na seção 4.1.3.

Custo unitário de violação da evaporação

Na prática, é claro que a evaporação não pode ser evitada. Portanto, em princípio o custo unitário para violação da evaporação deveria ser muito maior do que a das

¹ Tais iterações seriam úteis para calibrar não só a modelagem da evaporação, mas também a de outras funcionalidades, como a função de produção das usinas hidroelétricas e a vazão no canal Pereira Barreto.

² Ressalta-se que, ao resolver o problema por PDD, um subproblema de PL pode se tornar inviável, sem que o “problemão” multi-estágio seja inviável. Neste caso, a variável de folga é imprescindível para se obter a solução final (viável) para o problema.

restrições operativas no modelo (vazão mínima, volume de espera, etc..), de forma que a evaporação só fosse violada como último recurso.

Sugere-se que esse valor seja da mesma ordem da violação da função de produção das usinas hidroelétricas, já que ambas as restrições possuem, conceitualmente, o mesmo grau de severidade no atendimento. Posteriormente, será elaborada uma Nota Técnica tratando especificamente da questão dos valores atribuídos aos custos das variáveis de folga no modelo DESSEM.

4.1.5 Expressão final para a restrição

Como todas as variáveis e restrições hidráulicas são representadas em hm^3 no PL, a restrição de aproximação linear da evaporação para um intervalo de tempo de duração Δt (em horas) tomará a seguinte forma

$$\left(\frac{1}{\Delta t (3,6 \times 10^{-3})} \right) Evap_i^t - \left(\frac{k_{EVAP}}{2} \right) V_i^{t-1} - \left(\frac{k_{EVAP}}{2} \right) V_i^t + f_{EVAP_i}^t = RHSfix_{EVAP_i}^t \quad (4.5)$$

onde $RHSfix_{EVAP_i}^t = [Evap(V_{ref}) + k_{EVAP}(V_{min} - V_{ref})]$ é a chamada “parcela fixa” do termo independente (RHS) da restrição, e $f_{EVAP_i}^t$ é a variável de folga para evaporação, que é penalizada severamente na função objetivo.

Em relação à segunda parcela à esquerda na restrição, referente ao armazenamento ao final do período $t-1$, deve-se ressaltar que:

- se $t = 1$, então V_i^0 é um dado de entrada, e assim essa parcela pode ser incorporada à parcela fixa do RHS da restrição;
- se $t \neq 1$ e t corresponde ao primeiro período de um estágio quando se resolve o problema por PDD, então V_i^{t-1} é uma variável de estado do PL. Assim, essa parcela vai para o lado direito da restrição, e pode ser considerada como uma “parcela variável” do RHS da restrição, uma vez que o seu valor pode variar por iteração, de acordo com a variação no valor de V_i^{t-1} ;
- se $t \neq 1$ e t não é o primeiro período de um estágio quando se resolve o problema por PDD, então esse termo permanece do lado esquerdo da restrição, já que então V_i^t é uma variável de decisão do PL.

- quando $t \neq 1$ e o problema é resolvido por “PL-Único”, a situação é semelhante à descrita no item anterior.

4.2. Termos adicionais nos cortes de Benders da PDD

Conforme descrito na seção 4.1.4, quando se resolve o problema por PDD (utilizando ou não a estratégia de agregação), existem períodos t onde o volume armazenado ao final do período anterior é uma variável de estado para o PL em questão, e a segunda parcela à esquerda na eq. (4.5) vai para o lado direito da restrição. Nestes casos, o fator de V_i^{t-1} nesse termo deve ser considerado no cálculo da derivada $\frac{\partial f}{\partial V_i^{t-1}}$, utilizada para obter o fator de V_i^{t-1} no corte de Benders a ser construído para o período $t-1$, na recursão *backward*. O último termo da expressão (4.6) abaixo mostra essa contribuição.

$$\begin{aligned} \pi_{V_i}^{t-1(k)} &= \frac{\partial f^{(k)}}{\partial V_i^{t-1}} = \left[\frac{\partial f^{(k)}}{\partial BHID_i^t} \right] \left[\frac{\partial BHID_i^t}{\partial V_i^{t-1}} \right] + \dots + \left[\frac{\partial f^{(k)}}{\partial REVAP_i^t} \right] \left[\frac{\partial REVAP_i^t}{\partial V_i^{t-1}} \right] = \\ &= \lambda_{BHID_i}^{t(k)} (+1) + \dots + \lambda_{REVAP_i}^{t(k)} \left(\frac{k_{evap}}{2} \right), \end{aligned} \quad (4.6)$$

onde $BHID$ e $REVAP$ se referem às restrições de balanço hídrico e evaporação, e λ_{BHID} e λ_{EVAP} são os multiplicadores dessas restrições, fornecidas pelo PL. O índice k representa a iteração corrente.

4.3. Avaliação da acurácia na aproximação

Após a resolução do problema, é possível calcular qual seria o valor exato de evaporação em cada intervalo de tempo. Para tal, basta aplicar a expressão (2.6) para o volume armazenado médio em cada instante de tempo, que é um resultado do problema. A partir desses valores “exatos de evaporação”, podem-se obter os desvios da modelagem da evaporação ao longo do horizonte de estudo. Caso esses desvios se tornem maiores do que a precisão desejada, calibra-se o parâmetro V_{ref} , conforme descrito na seção 4.1.3.

5. RELATÓRIOS DE SAÍDA

Os relatórios referentes à funcionalidade de evaporação das usinas hidroelétricas são mostrados nos arquivos relacionados a seguir, os quais são ilustrados com mais detalhes ao longo da seção 6.

ECO_EVAP: Este arquivo reproduz os coeficientes mensais de evaporação para cada usina hidroelétrica no estudo, que são lidas no cadastro de usinas hidroelétricas, podendo ser alteradas através dos registros AC.

AVL_EVAPLIN_YYY: Este arquivo mostra os resultados da modelagem linear para aproximação da evaporação como função do volume armazenado das usinas, conforme descrito na seção 4.1. O mnemônico YYY indica o módulo correspondente: “SIM” para simulação e “PDO” para a otimização (programação diária da operação).

SIM_EVAP: Este arquivo mostra os resultados dos desvios da evaporação para cada usina / período, para o horizonte de simulação.

PDO_EVAP: Este arquivo mostra os resultados dos desvios da evaporação para cada usina / período, para o horizonte de otimização.

Além desses relatórios mais detalhados, a evaporação nas usinas hidroelétricas é indicada também nos relatórios tradicionais de balanço hídrico nos arquivos PDO_OPERACAO, PDO_SUMAOPER, PDO_HIDR, SIM_OPERACAO e SIM_HIDR.

6. ESTUDO DE CASO

Nesta seção ilustra-se a utilização da funcionalidade de evaporação 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 evaporação, apresentados neste documento. 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	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 ENT DADOS.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 (5 períodos / dia)
Duração dos períodos	12h cada	variável,

6.2. Dados de evaporação

A seguir, reproduz-se um trecho dos registros UH do arquivos ENTDAADOS.XXX, que exemplifica o *flag* indicativo de consideração ou não da evaporação para cada usina. Esse *flag* é válido para ambos os horizontes de simulação e otimização.

&	ind	nome	ss	Vinic	Evap	di	hi	m	VmorInic	Tv	Pdconst
&X	XXX	XXXXXXXXXXXXXX	XX	XXXXXXXXXXXXXX	XXXXX	XX	XX	X	XXXXXXXXXXXXXX	XXXX	X
UH	173	MOXOTO	3	0.0	1	02	00	0	1220.0		
UH	4	FUNIL-GRANDE	1	0.0	1	I					
UH	27	CAPIM BRANC1	1	72.0	1	I					
UH	28	CAPIM BRANC2	1	0.0	1	I					
UH	25	NOVA PONTE	1	72.0	1	I					
UH	33	SÃO SIMÃO	1	25.7	1	I					
UH	156	TRES MARIAS	1	45.0	1	I					
UH	9	JAGUARA	1	0.0	1	I					
UH	11	VOLTA GRANDE	1	0.0	1	I					
UH	134	SALTO GRANDE	1	0.0	1	I					
UH	26	MIRANDA	1	80.0	1	I					
UH	10	IGARAPAVA	1	0.0	1	I					
UH	143	AIMORES	1	0.0	1	I					
UH	148	IRAPE	1	65.5	1	I					
UH	162	QUEIMADO	1	54.2	1	I					
UH	14	CACONDE	1	43.0	1	I					
UH	18	A. VERMELHA	1	16.0	1	I					
UH	37	BARRA BONITA	1	67.3	1	I					
UH	40	PROMISSAO	1	51.2	1	I					
UH	42	NAVANHANDAVA	1	0.0	1	I					
UH	15	E. DA CUNHA	1	0.0	1	I					

Figura 6.2 – Flag para consideração da evaporação nos registros UH do arquivo ENTDAADOS.XXX.

Conforme descrito na seção 2.6.1, não é possível considerar evaporação para usinas com enchimento de volume morto. Caso o usuário indique a consideração de evaporação para tais usinas, o modelo emite a seguinte mensagem:

```
ATENÇÃO: Evaporação não será considerada para os períodos de enchimento
de volume morto para a usina 173 (MOXOTO )
```

6.3. Resolução do problema

Para verificar a correção na implementação da funcionalidade de evaporação 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 6.3 e Figura 6.4. 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 EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO
-----

Cálculo da Programação Diária da Operação
Método: PL Único

Função objetivo do Problema Linear (FOBJ):      53205456.5 (1000$)
Custo futuro de operacao (ALFA)                :      37358374.0 (1000$)
Custo Presente (FOBJ-ALFA)                    :      15847082.5 (1000$)

```

Figura 6.3 - 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
X-----X-----X-----X-----X-----X
  ITER      Zinf      Zsup      GAP      TEMPO
      (1000$)    (1000$)    (%)
X-----X-----X-----X-----X-----X
  1      46194723.4 *****      0.2E+26      00:00:08
  2      47274638.8      59577441.4      26.024106862      00:00:10
  3      53038741.1      53246708.1      0.392103979      00:00:14
  4      53186511.2      53246708.1      0.113180853      00:00:17
  5      53202989.1      53210686.5      0.014467982      00:00:19
  6      53203008.9      53208561.7      0.010436990      00:00:22
  7      53203027.6      53208064.5      0.009467363      00:00:25
  8      53203035.1      53208064.5      0.009453111      00:00:28
  9      53203035.2      53207817.4      0.008988571      00:00:31
 10      53203741.7      53206312.7      0.004832283      00:00:33
 11      53203886.8      53206085.2      0.004131915      00:00:36
 12      53203977.3      53205931.6      0.003673232      00:00:39
 13      53204815.6      53205931.6      0.002097618      00:00:42
 14      53204827.7      53205892.3      0.002000847      00:00:45
 15      53204829.4      53205776.2      0.001779474      00:00:48
-----
 306      53205456.5      53205456.6      0.000000109      00:16:05
 307      53205456.5      53205456.6      0.000000109      00:16:09
 308      53205456.5      53205456.6      0.000000109      00:16:12
 309      53205456.5      53205456.6      0.000000108      00:16:16
 310      53205456.5      53205456.6      0.000000108      00:16:19
 311      53205456.5      53205456.6      0.000000108      00:16:23
 312      53205456.5      53205456.6      0.000000107      00:16:26
 313      53205456.5      53205456.6      0.000000107      00:16:30
 314      53205456.5      53205456.6      0.000000099      00:16:33
X-----X-----X-----X-----X-----X
RESOLUCAO DO PROBLEMA FINALIZADA COM SUCESSO
-----

```

Figura 6.4 - Relatório de Convergência – resolução do problema por PDD.

Conforme esperado, os custos totais de operação obtidos pelos dois modos de execução foram iguais. É importante ressaltar que a estratégia de cálculo “por fora” da evaporação que era adotada anteriormente (vide início da seção 4) em geral provocava custos diferentes de operação entre os modos Benders e PL-Único.

6.4. Relatórios de evaporação

Nesta seção mostram-se alguns dos relatórios emitidos pelo modelo em relação à funcionalidade de evaporação.

6.4.1 Relatório com os dados de entrada para a evaporação (ECO_EVAP.XXX)

Este arquivo lista os dados referentes à evaporação fornecidos pelo usuário (*flag* para consideração da evaporação nos registros UH) e os localizados do cadastro de usinas hidroelétricas (coeficientes mensais de evaporação). A Figura 6.5 ilustra esse arquivo:

```

-----
USIH:      Número de cadastro da usina hidroelétrica
Ievap:     Flag para consideração da evaporação
           0: não considera; 1: considera
Cfevap:    Coeficientes mensais de evaporação (cadastro)
-----

```

USIH ;	Nome ;	Ievap ;	Jan ;	Fev ;	Mar ;	Abr ;	Mai ;	Jun ;	Jul ;	Ago ;	Set ;	Out ;	Nov ;	Dez ;
1 ;	CAMARGOS ;	1 ;	0 ;	2 ;	29 ;	40 ;	51 ;	46 ;	32 ;	23 ;	24 ;	15 ;	4 ;	7 ;
2 ;	ITUTINGA ;	1 ;	2 ;	5 ;	31 ;	40 ;	48 ;	44 ;	30 ;	24 ;	27 ;	19 ;	6 ;	8 ;
4 ;	FUNIL-GRANDE ;	1 ;	6 ;	6 ;	31 ;	42 ;	48 ;	47 ;	33 ;	29 ;	33 ;	22 ;	10 ;	14 ;
24 ;	EMBORCACAÇÃO ;	1 ;	0 ;	2 ;	16 ;	36 ;	53 ;	54 ;	54 ;	50 ;	45 ;	16 ;	5 ;	19 ;
27 ;	CAPIM BRANCO1 ;	1 ;	2 ;	0 ;	18 ;	38 ;	51 ;	51 ;	48 ;	46 ;	45 ;	18 ;	6 ;	25 ;
28 ;	CAPIM BRANCO2 ;	1 ;	2 ;	0 ;	18 ;	40 ;	55 ;	56 ;	53 ;	49 ;	50 ;	19 ;	4 ;	23 ;
25 ;	NOVA PONTE ;	1 ;	16 ;	7 ;	23 ;	40 ;	61 ;	65 ;	67 ;	66 ;	54 ;	25 ;	13 ;	33 ;
33 ;	SÃO SIMÃO ;	1 ;	13 ;	11 ;	25 ;	46 ;	67 ;	72 ;	68 ;	66 ;	64 ;	22 ;	4 ;	25 ;
156 ;	TRES MARIAS ;	1 ;	-1 ;	-2 ;	28 ;	47 ;	61 ;	61 ;	58 ;	49 ;	49 ;	35 ;	21 ;	22 ;
9 ;	JAGUARA ;	1 ;	8 ;	3 ;	20 ;	44 ;	56 ;	54 ;	46 ;	44 ;	44 ;	22 ;	5 ;	26 ;
11 ;	VOLTA GRANDE ;	1 ;	9 ;	7 ;	24 ;	52 ;	65 ;	64 ;	54 ;	52 ;	50 ;	27 ;	5 ;	30 ;
134 ;	SALTO GRANDE ;	1 ;	18 ;	20 ;	22 ;	23 ;	27 ;	28 ;	34 ;	43 ;	48 ;	46 ;	26 ;	15 ;
26 ;	MIRANDA ;	1 ;	7 ;	4 ;	18 ;	37 ;	54 ;	54 ;	53 ;	52 ;	41 ;	15 ;	5 ;	26 ;
10 ;	IGARAPAVA ;	1 ;	8 ;	5 ;	24 ;	48 ;	60 ;	58 ;	51 ;	48 ;	48 ;	26 ;	7 ;	29 ;
143 ;	AIMORES ;	1 ;	-7 ;	16 ;	38 ;	41 ;	37 ;	33 ;	28 ;	19 ;	33 ;	30 ;	16 ;	5 ;
148 ;	IRAPE ;	1 ;	-13 ;	-7 ;	23 ;	56 ;	72 ;	72 ;	63 ;	37 ;	37 ;	43 ;	31 ;	17 ;
162 ;	QUEIMADO ;	1 ;	21 ;	4 ;	21 ;	33 ;	59 ;	70 ;	77 ;	79 ;	80 ;	51 ;	17 ;	51 ;
14 ;	CAÇONDE ;	1 ;	18 ;	11 ;	35 ;	49 ;	60 ;	60 ;	54 ;	55 ;	47 ;	17 ;	19 ;	30 ;
18 ;	A. VERMELHA ;	1 ;	12 ;	16 ;	30 ;	53 ;	73 ;	74 ;	65 ;	61 ;	58 ;	23 ;	3 ;	27 ;
37 ;	BARRA BONITA ;	1 ;	23 ;	17 ;	38 ;	64 ;	73 ;	64 ;	50 ;	43 ;	42 ;	19 ;	1 ;	30 ;
40 ;	PROMISSÃO ;	1 ;	16 ;	18 ;	37 ;	62 ;	77 ;	72 ;	59 ;	55 ;	53 ;	22 ;	4 ;	30 ;

Figura 6.5 - Relatório de ECO dos dados de evaporação para as usinas hidroelétricas (ECO_EVAP.XXX)

6.4.2 Relatório com os dados da modelagem da evaporação (AVL_EVAPLIN_YYY.XXX)

Este arquivo mostra os parâmetros utilizados e/ou calculados para a modelagem da evaporação (V_{ref} , $Evap(V_{ref})$ e k_{EVAP}) para cada usina hidroelétrica, conforme descrito na seção 4.1. Trechos dos relatórios para os módulos de simulação e otimização no caso

em estudo são mostrados na Figura 6.6 e Figura 6.7, respectivamente. Os relatórios para os módulos de simulação e otimização possuem o mesmo formato.

```

-----
USIH: Número de cadastro da usina hidroelétrica
MÊS: Número do mês para o qual é válida a aproximação
Cfevap: Coeficiente mensal de evaporação (cadastro)
Vref: Volume de referência para a aproximação (Total, com volume morto)
EvapRef: Evaporação para o volume de referência
DerEvap: Derivada da aproximação linear
-----
-----;-----;-----;-----;-----;-----;-----;
; ; ; Cfevap ; Vref ; EvapRef ; DerEvap ;
USIH; MÊS ; Nome ; (mm/mes); (hm3) ; (m3/s) ; ((m3/s)/hm3);
-----;-----;-----;-----;-----;-----;-----;
  1 ; 12 ; CAMARGOS ; 7 ; 657.60 ; 0.17 ; 0.000152 ;
 27 ; 12 ; CAPIM BRANC1 ; 25 ; 241.13 ; 0.29 ; 0.000485 ;
 28 ; 12 ; CAPIM BRANC2 ; 23 ; 878.80 ; 0.47 ; 0.000292 ;
 25 ; 12 ; NOVA PONTE ; 33 ; 10716.00 ; 4.74 ; 0.000352 ;
 33 ; 12 ; SAO SIMAO ; 25 ; 11432.00 ; 5.71 ; 0.000448 ;
156 ; 12 ; TRES MARIAS ; 22 ; 16472.40 ; 7.60 ; 0.000401 ;
 26 ; 12 ; MIRANDA ; 26 ; 1090.80 ; 0.48 ; 0.000393 ;
143 ; 12 ; AIMORES ; 5 ; 179.73 ; 0.06 ; 0.000168 ;
148 ; 12 ; IRAPE ; 17 ; 5224.80 ; 0.78 ; 0.000130 ;
162 ; 12 ; QUEIMADO ; 51 ; 464.65 ; 0.92 ; 0.002461 ;
 14 ; 12 ; CACONDE ; 30 ; 454.20 ; 0.31 ; 0.000454 ;
 18 ; 12 ; A. VERMELHA ; 27 ; 9991.20 ; 6.02 ; 0.000454 ;
 37 ; 12 ; BARRA BONITA ; 30 ; 2621.80 ; 3.11 ; 0.000712 ;
 40 ; 12 ; PROMISSAO ; 30 ; 6982.40 ; 5.79 ; 0.000353 ;
 47 ; 12 ; A.A. LAYDNER ; 34 ; 6375.00 ; 5.39 ; 0.000503 ;
 49 ; 12 ; CHAVANTES ; 18 ; 8186.80 ; 2.56 ; 0.000220 ;
 61 ; 12 ; CAPIVARA ; 15 ; 9395.20 ; 2.96 ; 0.000235 ;
 43 ; 12 ; TRES IRMAOS ; 27 ; 12682.20 ; 7.38 ; 0.000369 ;
 34 ; 12 ; I. SOLTEIRA ; 26 ; 18494.40 ; 10.79 ; 0.000344 ;
120 ; 12 ; JAGUARI ; 12 ; 1077.40 ; 0.22 ; 0.000155 ;

```

Figura 6.6 - Relatório da modelagem linear para aproximação da evaporação, para o módulo de simulação no caso em estudo (SIM_EVAPLIN.XXX).

```

-----;-----;-----;-----;-----;-----;-----;
; ; ; Cfevap ; Vref ; EvapRef ; DerEvap ;
USIH; MÊS ; Nome ; (mm/mes); (hm3) ; (m3/s) ; ((m3/s)/hm3);
-----;-----;-----;-----;-----;-----;-----;
  1 ; 12 ; CAMARGOS ; 7 ; 655.27 ; 0.17 ; 0.000152 ;
  1 ;  1 ; CAMARGOS ; 0 ; 655.27 ; 0.00 ; 0.000000 ;
190 ;  1 ; B. ESPERANCA ; 118 ; 3173.00 ; 11.88 ; 0.002487 ;
 27 ; 12 ; CAPIM BRANC1 ; 25 ; 233.25 ; 0.29 ; 0.000511 ;
 27 ;  1 ; CAPIM BRANC1 ; 2 ; 233.25 ; 0.02 ; 0.000041 ;
 28 ; 12 ; CAPIM BRANC2 ; 23 ; 878.00 ; 0.47 ; 0.000293 ;
 28 ;  1 ; CAPIM BRANC2 ; 2 ; 878.00 ; 0.04 ; 0.000025 ;
 25 ; 12 ; NOVA PONTE ; 33 ; 10704.08 ; 4.74 ; 0.000352 ;
 25 ;  1 ; NOVA PONTE ; 16 ; 10704.08 ; 2.30 ; 0.000170 ;
 33 ; 12 ; SAO SIMAO ; 25 ; 11406.35 ; 5.70 ; 0.000448 ;
 33 ;  1 ; SAO SIMAO ; 13 ; 11406.35 ; 2.96 ; 0.000233 ;
156 ; 12 ; TRES MARIAS ; 22 ; 16516.90 ; 7.62 ; 0.000401 ;
156 ;  1 ; TRES MARIAS ; -1 ; 16516.90 ; -0.35 ; -0.000018 ;
 26 ; 12 ; MIRANDA ; 26 ; 1091.71 ; 0.48 ; 0.000395 ;
 26 ;  1 ; MIRANDA ; 7 ; 1091.71 ; 0.13 ; 0.000106 ;
143 ; 12 ; AIMORES ; 5 ; 156.55 ; 0.06 ; 0.000174 ;
143 ;  1 ; AIMORES ; -7 ; 156.55 ; -0.08 ; -0.000243 ;

```

Figura 6.7 - Relatório da modelagem linear para aproximação da evaporação, para o módulo de otimização no caso em estudo (PDO_EVAPLIN.XXX).

Observa-se que, como há mudança de mês ao longo do horizonte de otimização, são necessários dois modelos para cada usina nesse módulo de otimização, já que o coeficiente de evaporação varia com o mês. Os valores negativos na derivada da evaporação se referem às situações em que o coeficiente de evaporação para a usina / mês em questão é negativo.

6.4.3 Relatórios de avaliação da acurácia da modelagem linear para a evaporação (YYY_EVAP.XXX)

Estes arquivos fazem uma comparação entre os valores de evaporação obtidos pelo modelo, através da aproximação linear, e os valores calculados “por fora”, *a posteriori*, a partir dos resultados de volume armazenado obtidos para as usinas nos módulos de simulação e otimização. Este arquivo é bastante útil para avaliar a acurácia alcançada pelo modelo na representação da evaporação, e identificar eventuais situações em que houve desvios acima dos valores desejados. Os relatórios para os módulos de simulação (YYY = “SIM”) e otimização (YYY = “PDO”) possuem o mesmo formato, e são exemplificados na Figura 6.8.

```

-----
IPER:      Índice do período
USIH:      Número de cadastro da usina hidroelétrica
TipoUsih:  RV: Reservatório;
           FD: Fio d'água
Cfevap:    Coeficientes mensais de evaporação (cadastro)
Vmed:      Volume médio no período (Total, incluindo volume morto)
Evap:      Evaporação no reservatório:
           Modelo: Resultado do modelo (PL)
           Exata:  Calculada "por fora", pela expressão exata
Desvio:    Desvio entre a evaporação obtida pelo modelo e o valor exato
-----

```

IPER	USIH	Nome	Tipo	Cfevap	Vmed Total	%Vutil	Modelo	Exata	Desvio	
			Usih;	(mm/mes);	(hm3)		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(%)
1	1	CAMARGOS	RV	7	656.97	79.91	0.17	0.17	0.00	0.00
1	2	ITUTINGA	FD	8	11.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00
1	173	MOXOTO	FD	152	1226.00	-	5.16	5.16	0.00	0.00
1	4	FUNIL-GRANDE	FD	14	304.00	-	0.20	0.20	0.00	0.00
1	27	CAPIM BRANC1	RV	25	234.19	46.00	0.29	0.29	0.00	0.00
1	28	CAPIM BRANC2	RV	23	878.33	33.43	0.47	0.47	0.00	0.00
1	25	NOVA PONTE	RV	33	10710.30	79.95	4.74	4.74	0.00	0.00
1	33	SAO SIMAO	RV	25	11417.74	79.74	5.71	5.71	0.00	0.00
1	156	TRES MARIAS	RV	22	16521.26	80.32	7.62	7.62	0.00	0.00
1	9	JAGUARA	FD	26	450.00	-	0.33	0.33	0.00	0.00
1	11	VOLTA GRANDE	FD	30	2244.00	-	2.26	2.26	0.00	0.00
1	134	SALTO GRANDE	FD	15	78.00	-	0.03	0.03	0.00	0.00
1	26	MIRANDA	RV	26	1092.80	81.37	0.48	0.48	0.00	0.00
1	10	IGARAPAVA	FD	29	480.00	-	0.56	0.56	0.00	0.00
1	143	AIMORES	RV	5	168.33	40.67	0.06	0.06	0.00	0.04
1	148	IRAPE	RV	17	5226.08	80.03	0.78	0.78	0.00	0.00
1	162	QUEIMADO	RV	51	467.37	80.59	0.93	0.93	0.00	0.00

Figura 6.8 - Relatório de avaliação da modelagem linear para a evaporação.

Nota-se que os desvios são praticamente nulos, considerando-se a precisão de duas casas decimais para impressão¹. De fato, fazendo-se uma análise estatística dos desvios absolutos para todas as usinas e períodos, obteve-se, para o caso em estudo, a distribuição acumulada mostrada na Figura 6.9.

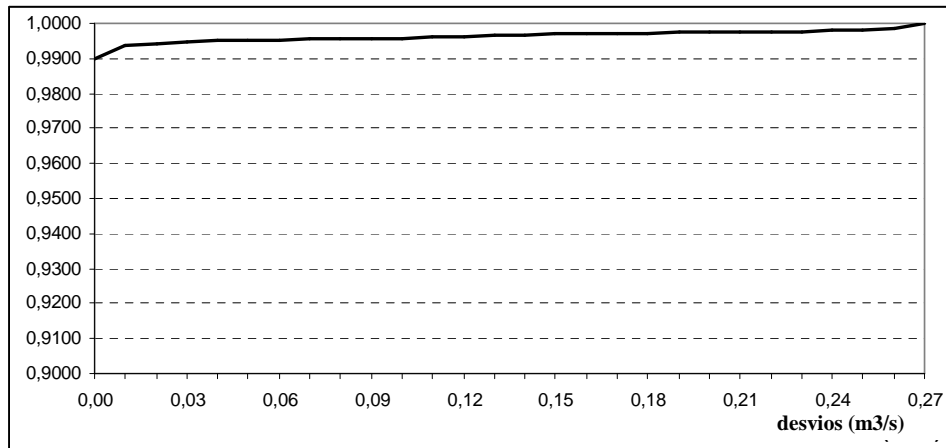


Figura 6.9 - Distribuição acumulada dos desvios absolutos entre os valores de evaporação obtidos pelo modelo linear e os valores exatos calculados *a posteriori*, diretamente pelos polinômios.

Observa-se que aproximadamente 99% dos desvios são iguais a zero (para a precisão de duas casas decimais), e o desvio máximo é de 0,27 m³/s. Estes resultados atestam a elevada acurácia na aproximação da evaporação dos reservatórios por um modelo linear.

6.5. Tempo Computacional

Com o objetivo de avaliar o impacto no tempo computacional da modelagem linear adotada para a evaporação, foram consideradas duas variantes do mesmo estudo, considerando ou não a evaporação. Para o modo de execução Benders, foram considerados três valores de *gap* de otimalidade. Os resultados de tempo computacional são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - 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 evaporação	00:00:26	00:00:44	00:04:55	00:16:34
Com evaporação	00:00:34	00:00:56	00:05:03	00:16:33

¹ O desvio é impresso com duas casas decimais, mas o seu cálculo é realizado considerando-se ambos os valores de evaporação real e do modelo com a precisão do computador.

Observa-se que a inclusão da modelagem linear para a evaporação no problema provoca um incremento no tempo computacional no modo PL-Único, assim como para valores reduzidos de gap de otimalidade no modo Benders. Ressalta-se, porém, que esse aumento não leva a uma mudança na ordem de magnitude do tempo de resolução do problema, e que um estudo mais exaustivo com diversos casos ainda é necessário para se quantificar, em termos médios, o aumento de tempo na resolução do problema quando se considera um modelo linear para a evaporação.

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 10⁸% 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 proposta de modelagem linear para a evaporação das 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);
- a modelagem concebida para a evaporação permite a resolução do problema por um algoritmo de programação linear, seja de forma direta (PL-Único) ou utilizando decomposição de Benders;
- a proposta de modelagem linear da evaporação representa um grande avanço em relação à abordagem tradicional de se realizar o cálculo “por fora” da evaporação, por dois motivos: é exata do ponto de vista matemática e permite que a evaporação seja avaliada de fato com base no volume médio do reservatório em cada período;
- Nos testes realizados, a funcionalidade de evaporação provocou um leve aumento no tempo computacional para resolução do problema, embora não tenha sido significativo em valores absolutos.

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 do Enchimento de Volume Morto nos Modelos SIMHIDR E DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Abril 2010.
- [5] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Uma Nova Estratégia da Definição dos Estágios para a Programação Dinâmica Dual Determinística - Aplicação ao Problema da Programação Diária da Operação”, Relatório Técnico CEPEL, Outubro 2009.