

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

Relatório Técnico

Nº/Ano: 4964/2015 **Nº de Páginas:** 15 **Nº de Anexos:**

Título: ACOPLAMENTO ENTRE OS MODELOS DESSEM-PAT E DECOMP CONSIDERANDO O TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA.

Departamento: Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Área de Responsabilidade: B200 **Conta de Apropriação:** 1600

Cliente:

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS
Rua Júlio do Carmo 251, 7º andar
Cidade Nova- Rio de Janeiro
CEP: 20211-160

Atenção:

Maria Helena Teles de Azevedo

Resumo:

Este Relatório apresenta uma estratégia para acoplamento entre os modelos de curto prazo (DECOMP) e programação diária da operação (DESSEM) considerando a valoração, na função de custo futuro do DECOMP, da água contida na calha dos rios, para as usinas cujo tempo de viagem para jusante é considerado no modelo DESSEM mas desprezado no modelo DECOMP. Foram apresentados resultados reais do modelo DESSEM-PAT para o sistema brasileiro, os quais mostraram os benefícios obtidos com a modelagem, que proporcionou um comportamento mais suave do modelo DESSEM próximo ao final de seu horizonte de estudo.

Autores:

Tiago Norbiato dos Santos – PUC / RJ
André Luiz Diniz Souto Lima – Cepel



Palavras-Chave:

Programação diária da operação, programação linear, tempo de viagem da água, acoplamento entre etapas do planejamento.

Classificação: Controlado

Gerente de Projeto


André Luiz Diniz Souto Lima

Tel.: 2598-6046 **Fax:** 2598-6482

E-mail: diniz@cepel.br

Chefe do Departamento


Maria Elvira Piñeiro Maceira

Tel.: 2598-6454 **Fax:** 2598-6482

E-mail: elvira@cepel.br

Aprovação


Roberto Pereira Caldas

Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – DP

03,03,15

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Projeto DESSEM

Relatório Técnico nº 02/2015

**ACOPLAMENTO ENTRE OS MODELOS DESSEM-
PAT E DECOMP CONSIDERANDO O TEMPO DE
VIAGEM DA ÁGUA**

Janeiro / 2015

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. CONCEITUAÇÃO DO ACOPLAMENTO COM O MODELO DECOMP: ÁGUA NA CALHA DO RIO.....	8
3. DADOS PARA O ACOPLAMENTO COM A CALHA DO RIO.....	9
4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO ACOPLAMENTO CONSIDERANDO A ÁGUA NA CALHA DO RIO	10
4.1. Cálculo do volume de água nas calhas dos rios.....	10
4.2. Valoração da água da calha na função de custo futuro.....	10
5. RELATÓRIOS DE SAÍDA	11
6. ESTUDO DE CASO.....	12
6.1. Dados gerais do estudo.....	12
6.2. Impactos na operação das usinas em cascada.....	12
6.3. Impactos na operação do sistema	13
7. CONCLUSÕES	15
8. REFERÊNCIAS	16

Siglas e Nomenclatura

FCF	Função de Custo Futuro
Horizonte	Soma das durações de todos os períodos correspondes ao horizonte de tempo ao longo do qual se deseja realizar o planejamento para o sistema
ONS	Operador Nacional do Sistema
Período	Cada intervalo de tempo na discretização do problema
PDO	Programação Diária da Operação
PMO	Programação Mensal da Operação
TV	Tempo de Viagem da água entre usinas hidroelétricas

Notação

α	Custo Futuro avaliado por uma Função de Custo Futuro, construída pelo modelo de curto prazo - DECOMP
π_i	Valor da água armazenada na usina i ao final do horizonte de estudo
τ_{ij}	Tempo de viagem entre as usinas i e j
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
NH	Número de usinas hidroelétricas
Q_i^t	Turbinamento da usina hidroelétrica i , no instante t
$Qdef_i^t$	Defluência da usina hidroelétrica i no instante t
R_i^T	Água na calha do rio a montante da usina i proveniente de defluências de usinas de montante no final do horizonte de estudo, ou seja, no período T
RHS_i	Termo independente do corte da Função de Custo Futuro
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 modelo 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 horizonte de estudo de até duas semanas. Os períodos de tempo consistem em intervalos que podem variar desde meia hora até um conjunto de horas, de forma a perfazer até 5 patamares cronológicos diários. Além de representar o atendimento à demanda e à reserva de potência do sistema, o modelo representa de forma detalhada a rede elétrica (carga por barra e restrições de limites de fluxo nos circuitos por um modelo linear DC, 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).

No modelo DESSEM-PAT, onde os intervalos de discretização temporal (períodos) são curtos (da ordem de horas), não se pode considerar que toda a vazão defluente das usinas de montante estará disponível para a usina de jusante no mesmo período. Desta forma, é imprescindível a consideração do tempo de viagem da água (TV) entre dois aproveitamentos hidroelétricos em cascata, como ilustrado na Figura 1.1 (para um tempo de viagem de 3 horas). A implementação dessa funcionalidade no modelo DESSEM-PAT, incluindo eventuais curvas de propagação da água, foi realizada na versão 7.0, disponibilizada em Janeiro de 2011 [2].

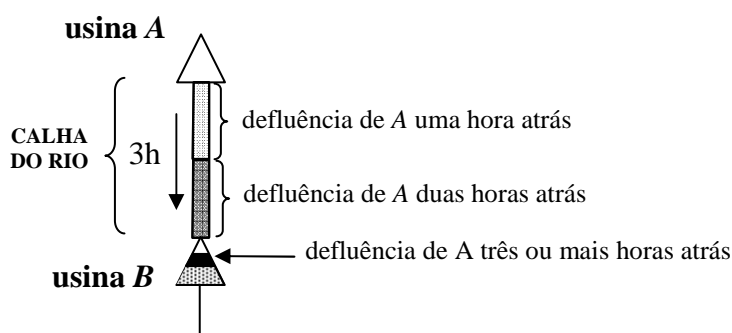


Figura 1.1 – Diagrama esquemático do tempo de viagem da água.

O modelo DESSEM-PAT faz parte de uma cadeia de modelos para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. Ao final do seu horizonte de estudo é necessário um acoplamento com o modelo DECOMP ([3] e [4]) ferramenta utilizada para a etapa Curto Prazo. Este acoplamento é realizado por uma Função de Custo Futuro, que avalia o custo no futuro em função do estado do sistema ao final do horizonte de estudo.

Uma variável considerada para o acoplamento entre os modelos DECOMP e DESSEM-PAT são os volumes armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas. Outra importante parcela são as defluências das usinas hidroelétricas com TV [5] .

Para as usinas em que o TV é considerado em ambos os modelos, são construídos coeficientes na FCF fornecida pelo modelo DECOMP. Nesta situação, as defluências destas usinas são tratadas diretamente como variáveis de acoplamento entre os modelos. Contudo, a duração dos intervalos de tempos no modelo DECOMP (semana/mês) são consideravelmente maiores do que no modelo DESSEM (horas), por isso nem todas as usinas são representadas com TV em ambos os modelos.

Este Relatório Técnico apresenta uma abordagem para representar o valor da água defluida por usinas com TV no modelo DESSEM-PAT enquanto que no modelo DECOMP não há deslocamento temporal para a defluência das usinas hidroelétricas.

2. CONCEITUAÇÃO DO ACOPLAMENTO COM O MODELO DECOMP: ÁGUA NA CALHA DO RIO

Ao final do horizonte de estudo, o modelo DESSEM-PAT é acoplado com o modelo de DECOMP através da FCF a qual valoriza a água armazenada nos reservatórios das usinas hidroelétrica e as defluências das usinas com tempos de viagem maiores de uma semana.

Para usinas com TV desconsiderados no modelo DECOMP, nos períodos próximos ao final do horizonte de estudo, as vazões defluentes da usina de montante A não chegam à usina hidroelétrica de jusante B (Figura 2.1) antes do final do estudo e estas defluências não são contabilizadas na FCF. Isto causa um problema na avaliação do valor da água, já que o modelo considera o aumento do custo de operação ao se perder água na usina de montante, mas não contabiliza o benefício no armazenamento dessa água na usina de jusante, o que irá ocorrer no futuro bem próximo (já que esse volume de água se situa na calha do rio entre as usinas A e B, conforme detalhado na Figura 2.1). Como consequência, o modelo tenderá a evitar defluências das usinas de montante com tempo de viagem para jusante nos períodos posteriores a $T - \tau$, onde τ é o TV (em períodos) entre as usinas e T é o índice do último período.

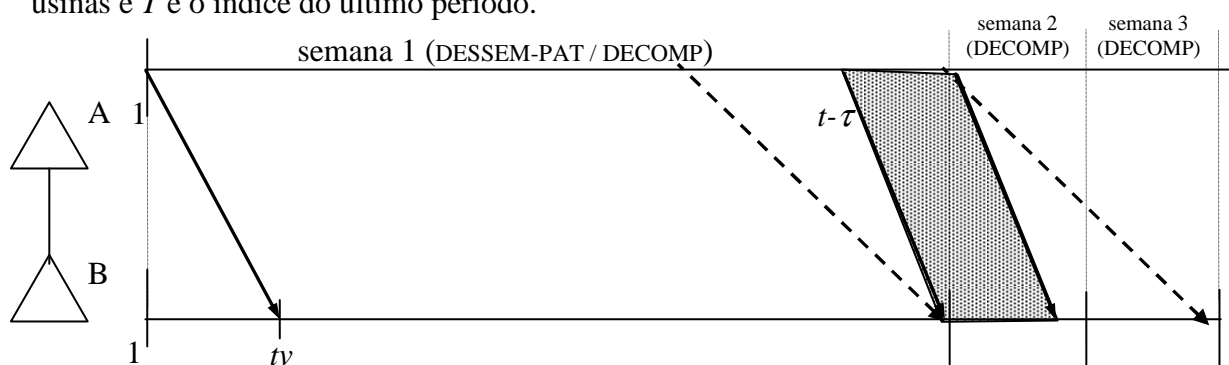


Figura 2.1 - Representação esquemática do impacto do tempo de viagem no final do horizonte do modelo DESSEM-PAT

Ressalta-se que, mesmo havendo benefício em turbinar a água em montante, devido à geração de energia, a ausência da parcela referente ao aumento do volume armazenado a jusante na função de custo futuro pode fazer com que o “custo” dessa vazão defluente se torne muito alto. Desta forma, torna-se necessária uma formulação matemática que leve em consideração o benefício futuro da água presente na calha do rio entre as usinas A e B.

3. DADOS PARA OACOPLAMENTO COM A CALHA DO RIO

O tempo de viagem da água para cada conjunto de usinas – montante e jusante - deve ser informado através de registros "TVIAG", que contém: o número da usina de montante; o tipo de elemento de jusante: usina hidráulica ou seção de rio¹; o número da usina ou seção de rio de jusante; o tempo de viagem em horas; e a forma de modelagem desejada para o tempo de viagem: por translação ou propagação (vide especificação funcional do tempo de viagem em [5]). Os seguintes dados são ainda necessários:

- Para estudos com tempo de viagem entre uma usina e uma seção de rio, devem ser criadas seções de rio através dos registros SECR, os quais contém seu número, nome e usinas de montante com os seus respectivos fatores de participação na afluência da seção de rio;
- As curvas de propagação, para (usinas com esta forma de representação do tempo de viagem), serão informadas em arquivos através dos registros “CURTV”.
- As defluências anteriores ao estudo, e que chegam a usina de jusante no horizonte de estudo, devem ser informadas pelos registros “DEFANT”.

Ressalta-se que o acoplamento com o modelo DECOMP (modelo de curto prazo) referente à água presente na calha do rio é considerada automaticamente pelo modelo DESSEM-PAT, ao se definir um registro TVIAG. Para tanto, é necessário informar quais usinas foram considerados no modelo DECOMP com tempo de viagem. Os Lags para essas usinas serão calculados pelo modelo de acordo com o tempo de viagem informado para o modelo DESSEM-PAT. Estas informações podem ser dadas através dos registros “MAPFCF”/”TVIAG”.

Maiores detalhes para a entrada de dados para o modelo dessem podem ser obtidos no manual do usuário [1].

¹ No modelo DESSEM, é possível informar tempo de viagem entre uma usina hidroelétrica e determinada seção de rio.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO ACOPLAMENTO CONSIDERANDO A ÁGUA NA CALHA DO RIO

A fim de atenuar o problema da "perda" de água no sistema relatado na seção 2, propõe-se nesse relatório adicionar esse volume de água, que está na calha do rio, ao volume armazenado da usina *B*, apenas para fins de acoplamento com a função de custo futuro do DECOMP. Ou seja, em todas as restrições operativas do instante *T* será considerado o volume real da usina de jusante, porém na composição do custo futuro deve-se levar em consideração o benefício futuro da água presente na calha do rio.

4.1. Cálculo do volume de água nas calhas dos rios

A água presente na calha do rio contabiliza a água na calha do rio a montante de cada usina *i*, proveniente de defluências de usinas de montante, ao final de um dado período *t* qualquer, será dado por:

$$R_i^t = \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=0}^{\tau_{ji}-1} (Q_j^{T-t} + S_j^{T-t}), \quad (4.1)$$

onde M_i é o conjunto de usinas a montante de *i*, τ_{ji} é o TV entre *j* e *i*, e *Q* e *S* correspondem ao turbinamento e vertimento nas usinas, respectivamente.

Portanto, a quantidade de água acumulada nas calhas dos rios ao final do horizonte de estudo será dado pelos valores das variáveis R_i^T .

4.2. Valoração da água da calha na função de custo futuro

Para fins de valoração da água contabilizada no conjunto de variáveis R_i^T , o coeficiente referente ao armazenamento nesta usina multiplicará não só o volume armazenado da usina, mas também o volume que se encontra na calha do rio. Caso a usina *i* seja fio d'água, utiliza-se o multiplicador da vazão afluente a essa usina, que também é impresso nos cortes do DECOMP.

A equação (4.2) abaixo ilustra como fica a expressão de cada corte da FCF com este acoplamento:

$$\alpha \geq RHS_i - \sum_{i=1}^{NH} \pi_i (V_i^T + R_i^T) \quad (4.2)$$

onde α é o custo futuro, RHS_i é o termo independente do corte, *V* é o volume armazenado no final do período e π é o valor da água armazenada na usina *i*

5. RELATÓRIOS DE SAÍDA

A reprodução dos dados de entrada e a operação com relação ao tempo de viagem são impressos nos seguintes arquivos:

SIM_ECO_TVIAG.XXX: reprodução dos dados de entrada para a representação do tempo de viagem, fornecidos nos registros TVIAG, para o período de simulação;

PDO_ECO_TVIAG.XXX: reprodução dos dados de entrada para a representação do tempo de viagem, fornecidos nos registros TVIAG, para o período de otimização;

PDO_OPER_TVIAG_CALHA.XXX: relatório de operação referente ao comportamento das restrições de tempo de viagem da água. Em particular, mostra-se o acompanhamento da água que se encontra atualmente na calha dos rios, assim como as parcelas desse volume que chegarão ao elemento de jusante (usina hidroelétrica ou seção de rio) antes e após o horizonte de estudo.

6. ESTUDO DE CASO

Nesta seção são apresentados resultados da consideração da água na calha do rio para o acoplamento com o modelo de curto prazo no modelo DESSEM-PAT, quando executado no modo “Estágio Único”. O estudo de caso foi fornecido pelo ONS, e corresponde aos dados referente à Revisão 3 de Setembro/Outubro de 2012 do Programa Mensal da Operação (PMO) realizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) utilizando o modelo DECOMP. Os dados desse modelo foram convertidos para o modelo DESSEM-PAT utilizando o conversor de dados DECODESS [6].

6.1. Dados gerais do estudo

O estudo contém uma série de dados referentes à configuração do sistema, restrições operativas e rede elétrica, sendo impossível listar todos eles. As características gerais do estudo são descritas a seguir:

- Número de subsistemas: 5 (Sendo 1 fictício);
- Número de usinas hidroelétricas: 143;
- Número de usinas termoelétricas: 87;
- Tamanho da rede elétrica: aproximadamente 6849 linhas de transmissão e 4942 barras elétricas;
- Número de períodos de tempo: 28 períodos, ao longo de 7 dias;

6.2. Impactos na operação da usinas em cascada

Observou-se que a representação da água na calha do rio para o acoplamento com o modelo DECOMP, apresentada na seção 2 e implementada na versão 8.4 do modelo DESSEM-PAT, foi capaz de atenuar as variações bruscas no comportamento da operação do sistema próximo ao final do horizonte de estudo. A Figura 6.1 mostra o impacto dessa funcionalidade na operação das usinas de Furnas e Itaparica.

Quando não se considera a água na calha do rio no acoplamento, existe uma "resguardo" em defluir ao final do horizonte de estudo, devido à aparente "perda" de água que no sistema que essa defluência provocaria. Por outro lado, quando a água na calha do rio é valorada no acoplamento com o modelo DECOMP, a defluência manteve o padrão dos períodos anteriores, pois nesta

situação, apesar dessa defluência reduzir o volume armazenado no reservatório de montante, observa-se o benefício futuro dessa água, que ocorrerá quando a mesma atingir a usina de jusante.

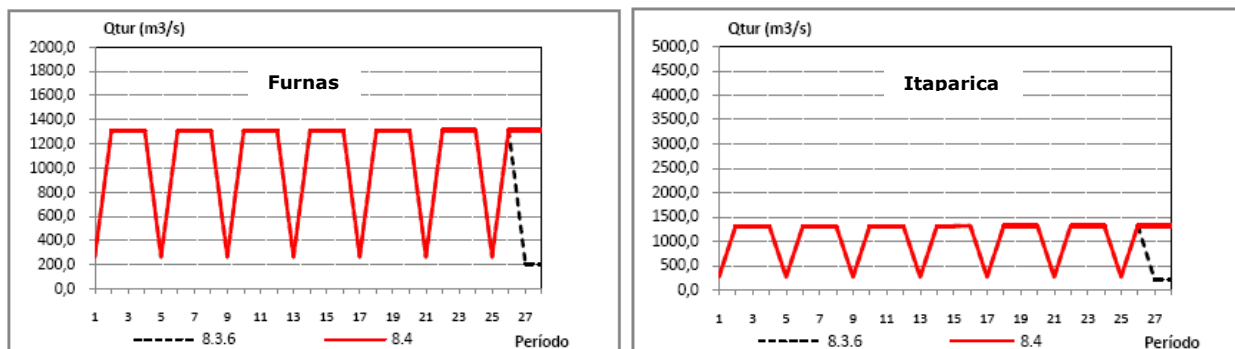


Figura 6.1 - Comportamento da defluência das usinas de Furnas e Itaparica ao longo do estudo, antes e depois da implementação da funcionalidade.

6.3. Impactos na operação do sistema

A Figura 6.2 mostra o benefício no comportamento do sistema como um todo com a consideração da água na calha dos rios no acoplamento com o DECOMP. Houve uma brusca redução tanto das variações no recebimento de energia do subsistema Sudeste (SE) como na geração térmica total do subsistema Nordeste (NE), próximo ao final do horizonte de estudo. Quando não se considera a água na calha do rio, o SE busca aumentar os volumes nos reservatórios de montante, visando reduzir o custo futuro. Para este fim, é necessário aumentar o recebimento de energia no SE através de um aumento de geração térmica no NE, acarretando em um aumento no custo presente.

Com a versão 8.4 do modelo DESSEM-PAT, a água na calha do rio é valorizada na FCF, ou seja, não é necessário reduzir a geração hidrelétrica no SE para aumentar o volume armazenado de acoplamento com o modelo DECOMP, evitando assim geração térmica no NE e assim reduzindo o custo presente quando comparado com a versão 8.3.6 (que não considerava a água na calha do rio para o acoplamento com o modelo DECOMP).

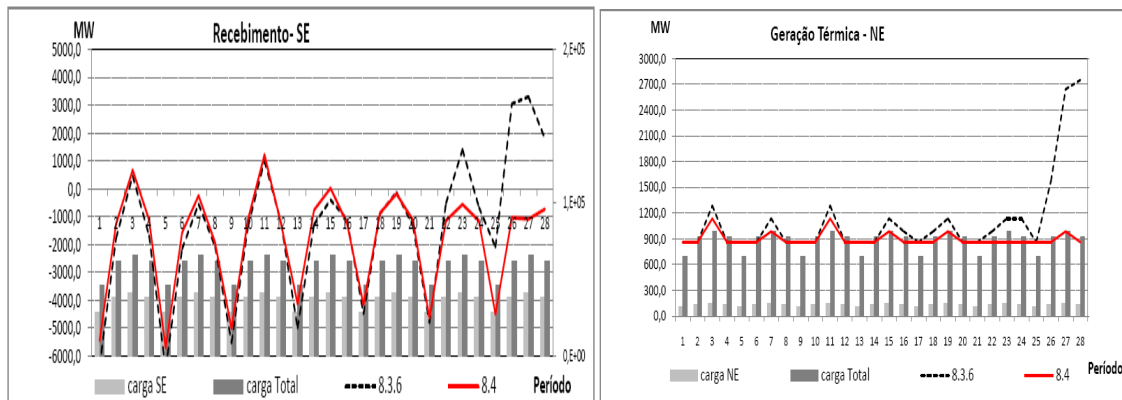


Figura 6.2 - Comportamento do recebimento do subsistema SE e geração térmica do Subsistema NE, antes e depois da implementação da funcionalidade.

7. CONCLUSÕES

Este relatório apresenta uma metodologia para considerar a água na calha do rio no acoplamento entre os modelos DESSEM-PAT e DECOMP. Esta implementação foi motivada por ter sido observado, em um estudo do Operador Nacional do Sistema (ONS) baseado no programa mensal de operação de setembro de 2012, um comportamento atípico ao final do horizonte de estudo para as usinas em que há tempo de viagem da água no modelo DESSEM-PAT, mas não no DECOMP. Em particular, observou-se uma inversão de recebimento de energia pelos subsistemas Nordeste e Sudeste, em um período com baixas afluências. Este comportamento era provocado pelo fato da água defluida nos últimos períodos pelas usinas de montante "sumir" do sistema, pois não atingia a usina de jusante nem era contabilizada na Função de Custo Futuro que acopla os modelos. A abordagem adotada buscou valorar a água na calha do rio na função de custo futuro, visto que essa água defluida nas usinas de montante com tempo de viagem chegará em um futuro breve para as usinas de jusante.

Foram apresentados resultados reais do modelo DESSEM-PAT para o sistema brasileiro, os quais mostraram os benefícios obtidos com a consideração da água na calha do rio na Função de Custo Futuro. As usinas de montante mantiveram o padrão de turbinamento apresentado durante todo o horizonte de estudo e a não houve oscilações sensíveis na geração térmica dos subsistemas próximo ao fim do estudo.

8. REFERÊNCIAS

- [1] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual do Usuário – Modelo DESSEM-PAT, versão 8.4”, Janeiro 2013.
- [2] Souza, T. M.; Diniz, A. L.; “An accurate representation of water delay times for cascaded reservoirs in hydro scheduling problems”. 2012 IEEE PES General Meeting, 2012, San Diego. Proceedings of the 2012 IEEE PES General Meeting, 2012.
- [3] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual do Usuário – Modelo DECOMP, versão 20”, Setembro 2013.
- [4] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual de Referência – Modelo DECOMP, versão 20”, Setembro 2013.
- [5] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, "Consideração do tempo de viagem da água nos modelos SIMHIDR e DESSEM-pat, Relatório Técnico CEPEL, Abril/2010.
- [6] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Conversor de casos do modelo DECOMP para o modelo DESSEM-PAT - Manual do Usuário”, versão 5.4, Agosto/2012.