

CEPEL

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

DECOMP

**DETERMINAÇÃO DA COORDENAÇÃO DA OPERAÇÃO
A CURTO PRAZO**

NOTA TÉCNICA Nº 10

**REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO POR PATAMARES
PARA AS USINAS FIO D'ÁGUA**

Junho /2002

Representação das Gerações Hidroelétricas, Turbinamentos e Balanços de Água por Patamares no Modelo Decomp

Esta Nota Técnica explica como o modelo DECOMP considera, na resolução do problema de despacho da operação para determinado estágio, as variáveis “turbinamento” e “geração hidráulica” por patamar de carga nas equações de balanço hídrico e função de produção. Com isso, procura-se justificar o comportamento apresentado pelo modelo no caso do PMO de maio/2002, para as usinas de Moxotó e Paulo Afonso. Posteriormente, é feita uma proposta de representação do balanço hídrico por patamar para as usinas a fio d’água, para contornar o problema encontrado neste caso.

1) Representação atual das funções de produção e balanço hídrico no modelo

1.a) Representação do turbinamento e geração hidráulica nas equações de balanço hídrico e função de produção.

No problema de programação linear (PL) de um determinado estágio do modelo DECOMP, as variáveis turbinamento (m^3/s) e geração hidráulica (MWh), para cada usina, são representadas **individualmente** por patamar. Com isto, as funções de produção, que estabelecem a relação turbinamento X geração para as usinas, são também representadas por patamar de carga:

$$GH_j^t(i) \leq (\lambda_{i,k} \times V^t(i)) + (\gamma_{i,k} \times vdef_j^t(i)) + gh_{i,k} \quad (1)$$

onde:

t : estágio atual,

j : número do patamar de carga, variando de 1 até o número de patamares de carga no estágio

i : índice da usina, variando de 1 até o número de usinas na configuração

k : índice da restrição, variando de 1 até o número de restrições que compõem a função de produção da usina i , no estágio t e patamar j

$GH_j^t(i)$: geração da usina i , no estágio t e patamar j

$V^t(i)$: volume médio da usina i no estágio t

$vdef_j^t(i)$: vazão defluente = turbinamento + vertimento da usina i , no estágio t e patamar j .

$\lambda_{i,k}$: coeficiente para volume armazenado, na k -ésima inequação de função de produção da usina i

$\gamma_{i,k}$: coeficiente para a vazão defluente total, na k -ésima inequação de função de produção da usina i

$gh_{i,k}$: termo independente, na k -ésima inequação de função de produção da usina i

1.b) Representação das equações de balanço hídrico

As equações de balanço hídrico representam a conservação da água nos reservatórios de um estágio para outro. No PL de um certo estágio t , constam uma equação de balanço hídrico para cada usina da configuração:

$$V^{t+1}(i) = V^t(i) + A^t(i) + \sum_{j \in M(i)} (Q^t(j) + S^t(j)) - (Q^t(i) + S^t(i)) - Ev^t(i) \quad (2)$$

onde:

$A^t(i)$: afluência incremental à usina i no estágio t .

$Q^t(i)$: turbinamento da usina i no estágio t .

$S^t(i)$: vertimento da usina i no estágio t .

$M(i)$: conjunto de todas as usinas imediatamente a montante da usina i .

$Ev^t(i)$: evaporação no reservatório da usina i no estágio t .

Para as usinas a fio d'água, a equação (2) resume-se a:

$$(Q^t(i) + S^t(i)) + Ev^t(i) = A^t(i) + \sum_{j \in M(i)} (Q^t(j) + S^t(j)) \quad (3)$$

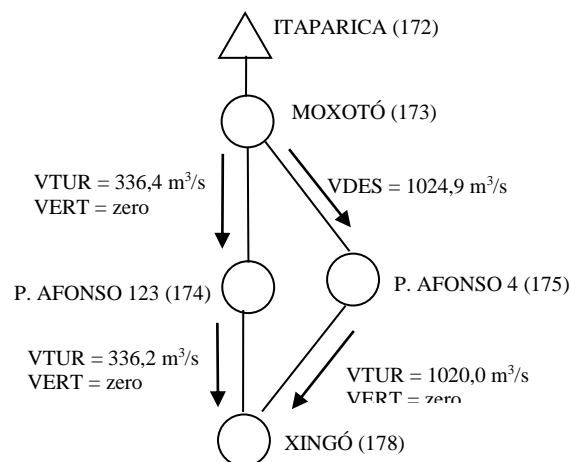
ou seja, a saldo líquido do total de água que chega e sai da usina no estágio t deve ser zero.

O balanço de água é verificado, portanto, em relação à quantidade total de água afluente e defluida **no estágio**.

2) Análise do comportamento das usinas de Moxotó e Paulo Afonso no caso do PMO de de Maio 2002

O volume defluente (turbinado + vertido) da usina de Moxotó se dirige à Paulo Afonso 123, enquanto o volume desviado vai para Paulo Afonso 4. Não se considera o tempo de viagem da água entre estas usinas neste caso.

Tomemos como exemplo a operação na semana 1, na qual se impôs uma geração fixa de 270 MW para a usina de P. Afonso 123. Os resultados extraídos do arquivo RELATO são mostrados a seguir:



		MOXOTÓ	P. AFONSO 123	P. AFONSO 4
GHID (MW)	pat. 1	200,0	270,0	2460,0
	pat. 2	0,0	270,0	1742,8
	pat. 3	101,6	270,0	0,0
	média	62,0	270,0	1.049,6

Podem ser feitas as seguintes observações em relação a esta operação:

a) As pequenas diferenças entre as vazões que entram e saem das usinas a fio d'água P. Afonso 123 e P. Afonso 4 se devem às suas evaporações respectivas de 0,2 e 4,8 m³/s, registradas também no arquivo RELATO. Desta forma, conclui-se que as equações de balanço hídrico na semana 1 para estas usinas foram atendidas pelo modelo.

b) Observando-se a relação entre o montante de turbinamento e geração média destas usinas durante o estágio, verifica-se, através do arquivo AVALIA, que os desvios na função de produção foram de 0,0% para Moxotó, 0,1% para P. Afonso 123 e 0,0% para P. Afonso 4. Conclui-se então que o modelo respeitou corretamente a função de produção destas usinas em cada patamar, já que eventuais incoerências nos turbinamentos e gerações de um dado patamar levariam a desvios ao se comparar os valores médios.

c) A questão levantada em relação a esta operação foi o fato de que a usina de Moxotó gera apenas nos patamares 1 e 3, enquanto a usina de P. Afonso gera uniformemente nos três patamares. Como a usina de P. Afonso 123 é fio d'água e não se considera o tempo de viagem para chegada até ela da água defluída por Moxotó, esperava-se que a geração (turbinamento) destas usinas apresentassem comportamentos semelhantes ao longo dos patamares, já que o vertimento em ambas usinas é zero. Assim, a operação realizada pelo modelo se assemelharia mais às condições existentes na prática.

Pelas observações (a) e (b), conclui-se que os resultados estão de acordo com a modelagem existente atualmente no DECOMP e apresentada no item 1 deste documento.

A observação (c), entretanto, reforça a vantagem que se teria em realizar um aprimoramento nesta modelagem, de forma a obrigar, para as usinas a fio d'água, que haja igualdade entre os volumes afluentes e defluentes à usina não apenas no estágio como um todo, mas em cada um de seus patamares. Pela modelagem atual, uma usina pode armazenar água durante um patamar para utilizá-la em outro, artifício que na prática não seria permitido para uma usina fio d'água. Para os reservatórios, isto pode ocorrer, contanto que o acúmulo de água em um patamar não faça a usina ultrapassar seu volume útil. No entanto, como no estudo do DECOMP não conhecemos a cronologia dos patamares ao longo do estágio, não temos como avaliar o acúmulo máximo de água que pode haver no reservatório durante o estágio, resultante da operação decidida pelo modelo. Conhecemos apenas seu estado no final do estágio.

3) Proposta de Aprimoramento na modelagem do balanço hídrico para as usinas a fio d'água

A proposta apresentada visa impedir que no modelo DECOMP as usinas a fio d'água possam armazenar água em um patamar de um determinado estágio para utilizá-la em outro patamar deste mesmo estágio. Para tal, criariam-se NPAT restrições adicionais para cada usina a fio d'água, sendo NPAT o número de patamares neste estágio. Estas restrições obrigariam a usina a não acumular água em qualquer dos patamares.

Para representar estas restrições de maneira adequada, seria preciso desmembrar a afluência natural e evaporação destas usinas no estágio em NPAT parcelas, que corresponderiam aos montantes referentes a cada patamar. A distribuição destes volumes seria feita segundo as durações dos patamares, assumindo como hipótese que a afluência e evaporação ocorrem de maneira uniforme ao longo do estágio.

Matematicamente, temos:

a) Seja K o número de patamares e d_k a duração de cada patamar k . Se D é a duração total do estágio, temos:

$$D = \sum_{k=1}^K d_k$$

b) A afluência natural e evaporação referentes à i -ésima usina fio d'água são desmembradas nas seguintes parcelas:

$$A^t(i) = \sum_{k=1}^K A_k^t(i), \quad \text{onde } A_k^t(i) = \frac{d_k}{D} \times A^t(i)$$

$$Ev^t(i) = \sum_{k=1}^K Ev_k^t(i), \quad \text{onde } Ev_k^t(i) = \frac{d_k}{D} \times Ev^t(i)$$

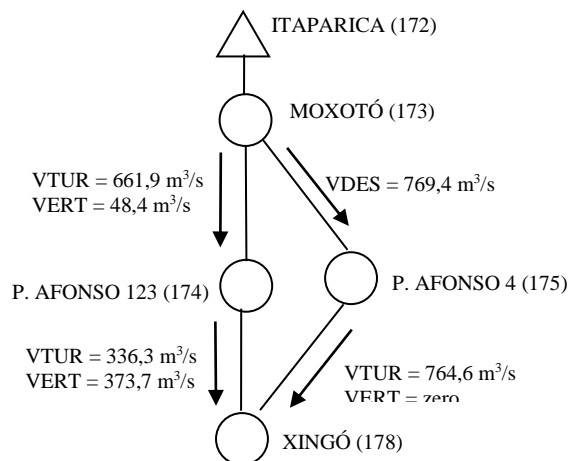
c) Considerando os turbinamentos e vertimentos já individualizados por patamar, adicionam-se no PL, para cada usina a fio d'água i , as seguintes equações:

$$A_k^t(i) + \sum_{j \in M(i)} (Q_k^t(j) + S_k^t(j)) - (Q_k^t(i) + S_k^t(i)) - Ev_k^t(i) = 0, \quad k = 1, K$$

Com isto, garante-se a não acumulação de água nas usinas a fio d'água ao longo dos patamares.

4) Implementação da Proposta no caso em estudo

Fez-se um teste da implementação proposta para o caso em estudo. Os resultados obtidos para a semana 1 foram os seguintes:



		MOXOTÓ	P. AFONSO 123	P. AFONSO 4
GHID (MW)	pat. 1	62,0	270,0	1621,3
	pat. 2	62,0	270,0	1259,3
	pat. 3	200,0	270,0	97,3
	média	122,0	270,0	786,7

Observa-se, nesta nova situação, que a geração de P. Afonso 123 acompanha a de Moxotó ao longo dos patamares. Além disso, nota-se que a relação entre as gerações de Moxotó e P. Afonso 123 nos patamares 1 e 2 (62 / 270) MW é idêntica à que ocorreu na média para a situação anterior. Isto se deve porque, tanto na média dos patamares, na situação anterior, como nos patamares 1 e 2, nesta nova situação, não ocorreram vertimentos e assim a relação entre as gerações foi a suficiente para atender a restrição de P. Afonso 123, sem desperdícios.

Já no patamar 3 observa-se uma geração adicional em Moxotó, cujo respectivo turbinamento não consegue ser absorvido por P. Afonso 123, causando vertimentos nesta usina. Embora a produtividade de P. Afonso 4 seja superior à de Moxotó (o que justificaria um desvio para turbinamento em P. Afonso 4 em vez de um turbinamento apenas em Moxotó), esta operação é justificada pelo custo marginal zero verificado para o NE neste patamar, e pelo fato do volume de água vertido não ter como ser armazenado em Itaparica, já que esta usina está sob uma restrição RHV que estabelece um valor fixo para o seu armazenamento.

Esclarecimentos adicionais sobre a NT

Após o envio da NT, foram feitas solicitações de esclarecimentos em alguns pontos, o que motivou o Anexo deste documento, onde estão reproduzidas as perguntas e respostas a tais questionamentos.

ANEXO: Complementação à Nota Técnica nº 10: Esclarecimentos sobre a operação para o caso do PMO de Maio com a metodologia proposta

1) Resposta aos questionamentos em relação à proposta original:

1-1) *pág. 1: item 1.a) na apresentação das parcelas referentes a equação de desigualdade da FPE é mencionado o volume médio da usina, $v^t(i)$, mas observamos que no manual consta volume disponível. Nossa dúvida é se foi realizado algum aprimoramento nesta representação ou se é apenas uma mudança de nomenclatura ainda não atualizada no manual.*

As inequações da FPE são construídas a partir do **volume disponível**, e não do volume médio. Houve apenas um engano ao redigir a Nota Técnica.

1-2)- *pág. 5: item 4) não entendemos porque ocorreu vertimento em Moxotó e PAfonso 123 nos resultados do exemplo numérico para proposta encaminhada. Considerando o ganho de produtividade quando se desvia água para turbinamento em PAfonso IV, não pode ocorrer turbinamento em Moxotó diferente do mínimo necessário para atender a restrições impostas sobre o grupo turbina-gerador desta usina ou outras restrições sobre a usina jusante, PAfonso 123 (restrições que traduzam um valor de mínima afluência p/a usina de PAfonso 123). Seria possível informar o total de vazão afluente na usina de ITAPARICA no referido exemplo e tb no caso estudo detalhado no item 2. Não deveriam ser o mesmo valor? Ainda, porque não foi possível gerar no patamar 3 em PAfonso 123, não há mercado?*

a) Vazões afluentes a Itaparica:

Estas vazões não serão necessariamente iguais nos casos rodados com e sem as restrições propostas de balanço hídrico por patamar para as usinas a fio d'água. Com esta nova metodologia, os problemas a serem resolvidos são um pouco diferentes e portanto as vazões defluentes de Sobradinho, decididas pelo modelo e que chegam a Itaparica, poderão sofrer modificações de um caso para o outro.

b) Geração em Paulo Afonso 123

Não houve ausência de geração de Paulo Afonso 123 no patamar leve. A restrição de geração fixa de 270 MW ao longo do estágio foi totalmente atendida.

c) Vertimentos ocorridos nas usinas de Moxotó e Paulo Afonso 123

O intercâmbio compulsório de 1300 MW do FC para o NE, somado à geração hidroelétrica que pode ser realizada na cascata decorrente apenas da vazão defluente mínima de 1300 m³/s imposta para Sobradinho e Itaparica, ultrapassa o mercado do NE para o patamar leve. Com isso, o sistema NE é obrigado a verter água, indicando a não necessidade de exportação de energia do FC para o NE durante a carga leve, o que se evidencia pelo custo marginal nulo obtida para o NE neste patamar.

Lembramos que as restrições de vazão mínima são representadas por patamar no modelo. No entanto, em sua formulação atual, apesar das defluências mínimas de Itaparica e Sobradinho ocorrerem em cada patamar, as usinas de Moxotó, Paulo Afonso 123, Paulo Afonso 4 e Xingó podem utilizar a água proveniente da defluência de Itaparica ao longo de todo o estágio, já que a modelagem atual permite que uma usina fio d'água "armazene" água de um patamar para o outro.

Já na metodologia proposta, esta defluência de Itaparica deve obrigatoriamente percorrer o restante da cascata no mesmo patamar, já que todas as usinas de jusante não possuem reservatório. Com isto, obriga-se um montante de geração mínima em cada patamar que, no caso do patamar leve, ultrapassa o mercado do NE, conforme mostra-se na tabela a seguir:

Energia disponível no NE

Fonte	Qmin (m ³ /s)	Produt. Média (MW/(m ³ /s))	Energia disponível (MW)
SOBRADINHO	1300,00	451,7 / 1903,6 ⁽²⁾	308,47
ITAPARICA	1300,00	608,2 / 1480,7 ⁽²⁾	533,98
MOXOTÓ	336,30 ⁽¹⁾	62 / 336,2 ⁽³⁾	62,00
PAULO AFONSO 123	336,30 ⁽¹⁾	270 / 336,30	270,00
PAULO AFONSO 4	1300 – 336,30 = 963,70	786,7 / 764,6 ⁽²⁾	991,55
XINGÓ	1300,00	2026,7 / 1474,6 ⁽²⁾	1786,72
BOA ESPERANÇA	240,00	105,6 / 267,5 ⁽²⁾	94,74
INTERCÂMBIO FC - NE	-	-	1300,00
BACIAS ESPECIAIS / PEQUENAS USINAS			34,00
TOTAL			5381,46
MERCADO NE NO PATAMAR LEVE, SEMANA 1			4281,00

(1) Vazão necessária para atender geração obrigatória de 270 MW em Paulo Afonso 123

(2) Produtibilidade média obtida pelos resultados da operação total do estágio (GHID/QDEF) com a metodologia

proposta, já que não houve vertimentos na usina

(3) Produtibilidade média obtida por consulta ao caso rodado com a metodologia atual, para o qual não houve vertimentos na usina

2) Comentários adicionais:

Algumas usinas a fio d'água podem, na prática, realizar uma regularização diária, ou seja, armazenar pequenos volumes de água ao longo do dia. Nestes casos, a utilização da restrição de balanço hídrico por patamar pode tornar sua operação muito rigorosa. Uma alternativa que poderia ser adotada é criar, nos registros UH do arquivo DADGER.XXX, um *flag* que indique, para cada usina, a necessidade ou não de inserção desta restrição para ela. Além de tornar esta nova implementação mais flexível, é possível com este artifício reproduzir os resultados para os casos já rodados anteriormente, bastando para isso deixar este *flag* desativado para todas as usinas, ou seja, utilizar os mesmos arquivos DADGER já existentes.