

Nova Metodologia Baseada em Optimização Não Linear para a Exploração de Recursos Hídricos

J.P.S. Catalão*, S.J.P.S. Mariano*, V.M.F. Mendes** e L.A.F.M. Ferreira***

* Departamento de Engenharia Electromecânica

Universidade da Beira Interior

Calçada Fonte do Lameiro – Covilhã

Telf: +351 275 329 759; fax: +351 275 329 972; e-mail: catalao@ubi.pt, sm@ubi.pt

** Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Rua Conselheiro Emídio Navarro – Lisboa

Telf: +351 218 317 038; fax: +351 218 317 009; e-mail: vfmendes@isel.pt

*** Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Instituto Superior Técnico

Avenida Rovisco Pais – Lisboa

Telf: +351 218 417 700; fax: +351 218 417 421; e-mail: lmf@ist.utl.pt

Resumo — Nesta comunicação é enunciado e descrito o problema de optimização da exploração de recursos hídricos. Uma nova metodologia baseada em optimização não linear é proposta para a resolução deste problema tendo em consideração o efeito de queda. Apresentam-se os resultados numéricos obtidos e conclui-se sobre o desempenho da nova metodologia proposta.

1. Introdução

O sistema electroprodutor nacional é caracterizado actualmente por uma acentuada dependência externa dos combustíveis fósseis e por uma elevada intensidade energética do Produto Interno Bruto, que traduz a quantidade de energia necessária para produzir riqueza. Esta intensidade para Portugal, sendo uma das mais elevadas na União Europeia, resulta não só de um problema estrutural da economia nacional, mas também da menor eficiência de exploração do sistema electroprodutor nacional no que respeita aos recursos endógenos e renováveis, como por exemplo, os recursos hídricos. Assim, a promoção da eficiência energética e das energias renováveis constitui uma importante contribuição para a descarbonização da economia nacional [1].

A componente hídrica assume relevo na produção anual de energia eléctrica, quer pela potência já instalada, quer pelo potencial ainda por aproveitar, embora a sua contribuição varie de anos húmidos para anos secos de acordo com a maior ou menor pluviosidade. Atendendo à evolução típica do diagrama de cargas ao longo do dia, os recursos hídricos têm a vantagem de poder responder prontamente a solicitações de potência, visto que, o armazenamento de energia sob a forma potencial constitui uma reserva estratégica de utilização praticamente imediata.

Nos aproveitamentos a fio de água a capacidade de armazenamento e a altura de queda são reduzidas. Devido ao reduzido volume de água nestes reservatórios, a altura de queda pode variar significativamente, tornando a eficiência de exploração sensível à altura de queda: efeito de queda. Em Portugal, essa é a situação por exemplo no rio Douro, cujos aproveitamentos contribuem de forma relevante para a produção de energia eléctrica, dispondo no seu conjunto de uma potência instalada que é cerca de metade da potência total do sistema hidroeléctrico nacional.

O efeito de queda é um problema complexo e relevante na optimização da exploração de recursos hídricos. Tipicamente, considera-se que os recursos hídricos operam em condições estacionárias com altura de queda constante, sendo assumindo que a potência entregue é representada por uma função afim do caudal de água turbinado. Contudo, nos aproveitamentos a fio de água a potência entregue tem que ser considerada como uma função não só do caudal de água turbinado, mas também da altura de queda.

A programação dinâmica foi uma das primeiras metodologias utilizadas para a resolução do problema de optimização da exploração de recursos hídricos [2]. A utilização da programação dinâmica para a resolução do problema permite obter a solução óptima. Contudo, a maldição da dimensionalidade implica que a sua utilização só seja possível para problemas de dimensão reduzida.

A programação linear em rede [3,4] foi proposta como alternativa à programação dinâmica, tendo despertado interesse nos investigadores pelo facto de uma cascata hídrica ter uma estrutura que pode ser matematicamente modelada por uma rede de fluxos.

Contudo, a programação linear em rede apresenta a desvantagem de não permitir a consideração correcta das curvas características de potência entregue versus caudal de água turbinado para as centrais hídricas, tipicamente curvas não lineares e não convexas.

Mais recentemente, a metodologia baseada em optimização linear inteira-mista foi utilizada para a resolução do problema de optimização da exploração de recursos hídricos [5, 6], usufruindo das vantagens da programação linear em rede e, simultaneamente, permitindo considerar a existência de zonas proibidas. Contudo, a discretização das curvas características de potência entregue versus caudal de água turbinado requer um incremento significativo na capacidade de memória e no tempo de computação.

A evolução tecnológica no final da década de noventa, ao nível da capacidade de cálculo dos computadores e do desempenho dos *solvers*, motivou a utilização de metodologias baseadas em optimização não linear para a resolução do problema de optimização da exploração de recursos hídricos [7]. As metodologias baseadas em optimização não linear permitem uma representação mais aproximada e fidedigna da realidade, comparativamente à programação linear em rede, apresentando hoje em dia tempos de computação aceitáveis [8].

Nesta comunicação é enunciado e descrito o problema de optimização da exploração de recursos hídricos. Uma nova metodologia baseada em optimização não linear é proposta para a resolução deste problema tendo em consideração o efeito de queda. Apresentam-se os resultados numéricos obtidos para um caso de estudo e conclui-se sobre o desempenho da nova metodologia proposta.

2. Formulação do Problema

O problema de optimização da exploração de recursos hídricos corresponde nesta comunicação a um problema de optimização não linear. A função objectivo a ser maximizada é dada por:

$$F = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \lambda_k p_{jk} + \sum_{j=1}^J \Psi_j(v_{jK}) \quad (1)$$

A função objectivo em (1) é composta por dois termos. O primeiro termo representa o lucro total auferido com a exploração dos recursos envolvidos no planeamento. O segundo termo representa o valor económico que a água armazenada nos reservatórios tem para a exploração futura.

O problema de optimização da exploração de recursos hídricos é sujeito a restrições de igualdade e restrições de desigualdade ou limites nas variáveis. As seguintes restrições descrevem as limitações de exploração associadas aos recursos:

$$v_{jk} = v_{j,k-1} + a_{jk} + \sum_{y \in \gamma_j} (q_{y,k-\tau_{y_j}^q} + s_{y,k-\tau_{y_j}^s}) - q_{jk} - s_{jk} \quad (2)$$

$$p_{jk} = q_{jk} \eta_{jk}(h_{jk}) \quad (3)$$

$$h_{jk} = l_{f(j)k}(v_{f(j)k}) - l_{t(j)k}(v_{t(j)k}) \quad (4)$$

$$v_j^{\min} \leq v_{jk} \leq v_j^{\max} \quad (5)$$

$$q_j^{\min} \leq q_{jk} \leq q_{jk}^{\max}(h_{jk}) \quad (6)$$

$$s_{jk} \geq 0 \quad (7)$$

Em (2) é apresentada a equação do balanço da água para cada reservatório.

Em (3) a potência entregue p_{jk} é considerada uma função do caudal de água turbinado q_{jk} e da eficiência de exploração η_{jk} , que depende da altura de queda h_{jk} .

Em (4) a altura de queda é considerada uma função do nível de água nos reservatórios a montante $l_{f(j)k}$ e a jusante $l_{t(j)k}$ da central, que dependem do volume de água nos reservatórios respectivos.

Em (5) impõem-se limites mínimos v_j^{\min} e máximos v_j^{\max} para o volume de água em cada reservatório j .

Em (6) impõem-se também limites mínimos e máximos para o caudal de água turbinado. O caudal máximo de água turbinado q_{jk}^{\max} pode ser diferente em cada hora k , quando existe uma significativa dependência com a altura de queda.

Em (7) impõe-se um limite mínimo nulo para o caudal de água descarregado, não tendo contudo limite máximo, i.e., o seu valor é suficientemente grande.

O volume inicial de água nos reservatórios v_{j0} , bem como a afluência aos reservatórios, são considerados valores conhecidos.

3. Problema de Optimização Não Linear

O problema de optimização não linear considerado nesta comunicação é formulado por:

$$\text{Max } F(\mathbf{z}) \quad (8)$$

sujeito a:

$$\mathbf{b}^{\min} \leq \mathbf{A} \mathbf{z} \leq \mathbf{b}^{\max} \quad (9)$$

$$\mathbf{z}^{\min} \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{z}^{\max} \quad (10)$$

Em (9) é apresentada uma restrição mais genérica que não só descreve (2), com $\mathbf{b}^{\min} = \mathbf{b}^{\max}$, mas também descreve a dependência que o caudal máximo de água turbinado tem relativamente à altura de queda.

A restrição (10) corresponde às restrições (5) a (7), i.e., corresponde aos limites mínimos e máximos para o volume de água, para o caudal de água turbinado, e para o caudal de água descarregado.

A potência entregue é representada por uma função não linear, sendo dada por:

$$p_{jk} = \eta_j^0 q_{jk} + \alpha_j l_{f(j)}^0 q_{jk} - \alpha_j l_{t(j)}^0 q_{jk} + \alpha_j \beta_{f(j)} q_{jk} v_{f(j)k} - \alpha_j \beta_{t(j)} q_{jk} v_{t(j)k} \quad (11)$$

Um novo parâmetro χ_j , que corresponde ao produto de α_j por $\beta_{f(j)}$, é definido para ponderar o efeito de queda.

Ainda, o caudal máximo de água turbinado é considerado dependente da altura de queda, sendo dado por:

$$q_{jk}^{\max} = \gamma_j^0 - \gamma_j^1 v_{f(j)k} + \gamma_j^2 v_{t(j)k} \quad (12)$$

4. Caso de Estudo

O caso de estudo é constituído por um sistema hidroeléctrico com sete reservatórios em cascata, apresentado na Fig.1, sendo o horizonte temporal de 168 horas. Este sistema hidroeléctrico é baseado no Douro Nacional: aproveitamentos a fio de água de 1-Pocinho, 2-Valeira, 4-Régua, 5-Carrapateiro e 7-Crestuma-Lever; aproveitamentos de albufeira de 3-Vilar-Tabuaço e 6-Torrão.

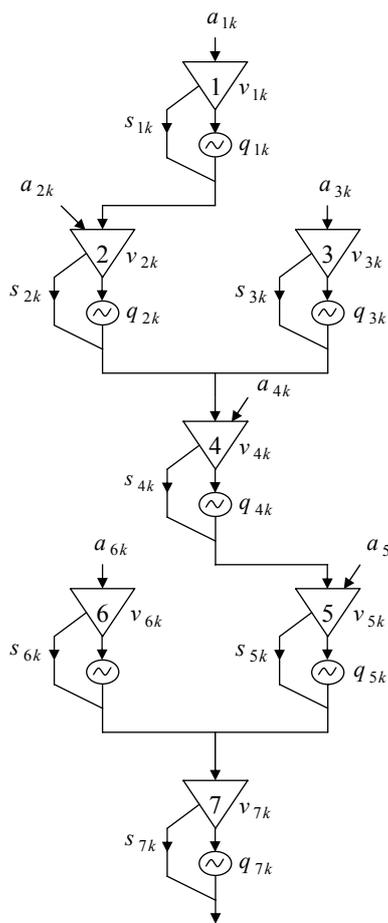


Fig. 1. Sistema hidroeléctrico com sete reservatórios em cascata

O perfil dos preços da energia eléctrica é apresentado na Fig.2, sendo \$ uma quantidade monetária simbólica.

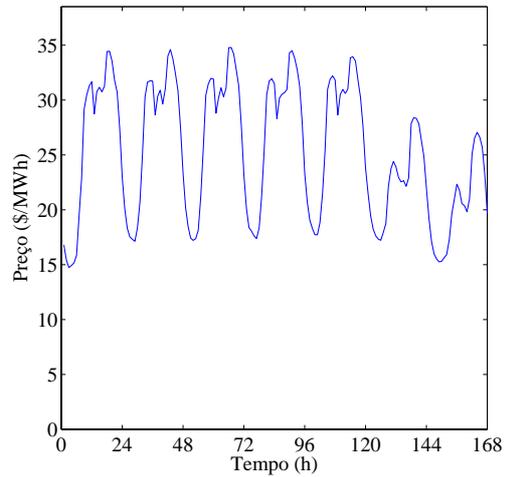


Fig. 2. Perfil dos preços da energia eléctrica

A nova metodologia proposta foi implementada num computador com processador a 600-MHz e 256 MB de RAM, usando a aplicação informática MATLAB e o solver Xpress-MP.

Na Fig.3 são apresentadas as trajectórias para o volume de água nos reservatórios. Os resultados obtidos são apresentados apenas para os aproveitamentos a fio de água.

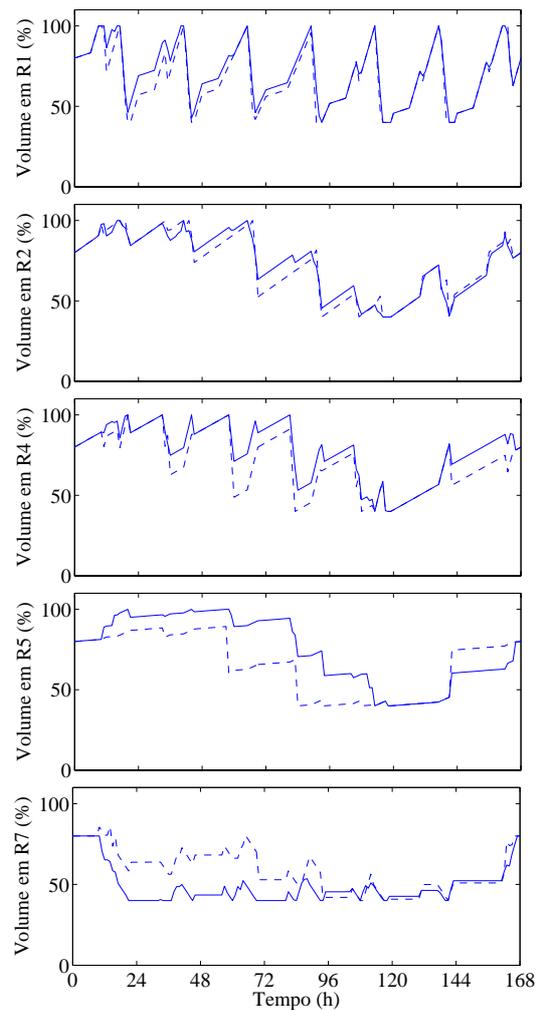


Fig. 3. Volume de água nos reservatórios

Nos resultados obtidos com a nova metodologia baseada em otimização não linear (linhas a traço contínuo), a trajectória para o volume de água nos reservatórios situados no início da cascata é elevada, comparativamente aos resultados obtidos com uma metodologia baseada em otimização linear (linhas a traço interrompido). Contrariamente, a trajectória para o volume de água no reservatório situado no fim da cascata é reduzida, visando aumentar a altura de queda para os reservatórios imediatamente a montante.

Na Fig.4 são apresentadas as trajectórias para o caudal de água turbinado.

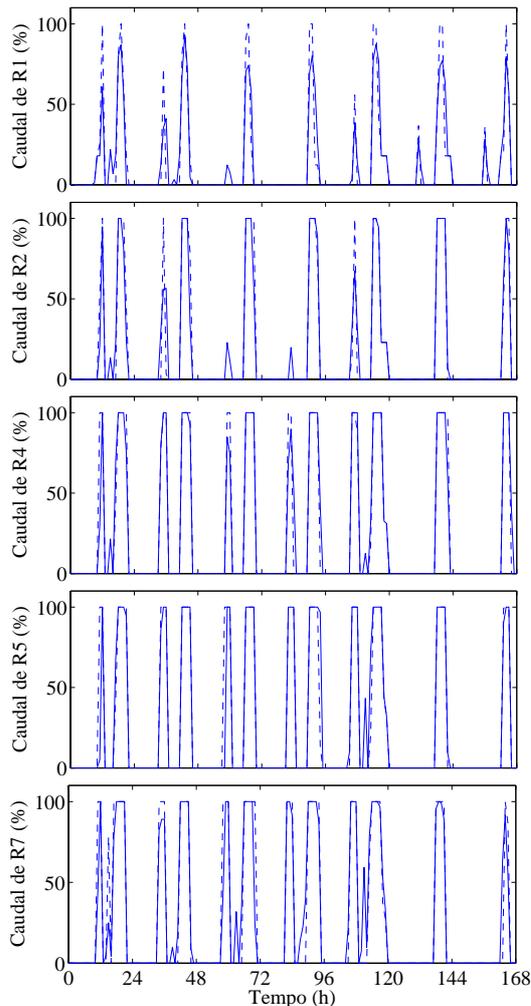


Fig. 4. Caudal de água turbinado proveniente dos reservatórios

Os resultados obtidos para o caudal de água turbinado proveniente dos reservatórios mostram que o caudal de água turbinado varia mais acentuadamente, entre o mínimo e o máximo, para uma metodologia baseada em otimização linear comparativamente à nova metodologia baseada em otimização não linear, visto que, a metodologia baseada em otimização linear ignora o efeito de queda.

Na Tabela I são apresentados os resultados comparativos entre as metodologias baseadas em otimização linear e não linear, para este caso de estudo. Assim, a nova metodologia proposta conduz a um lucro total superior.

TABELA I
RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS METODOLOGIAS BASEADAS EM OPTIMIZAÇÃO LINEAR E NÃO LINEAR

Optimização	Lucro (\$)	% Aumento	Tempo de computação (s)
Linear	1 522 440	-	2.25
Não linear	1 598 700	5.01	4.14

Ainda, o tempo de computação adicional requerido pela nova metodologia proposta é de apenas 1.89s.

5. Conclusões

A resolução do problema de optimização da exploração de recursos hídricos foi obtida através de uma nova metodologia baseada em optimização não linear, que considera não só a potência entregue como uma função do caudal de água turbinado e da altura de queda, mas também que o caudal máximo de água turbinado pode ser função da altura de queda, visando beneficiar a eficiência de exploração. A exploração óptima de recursos hídricos foi ilustrada em função do novo parâmetro apresentado, que pondera o efeito de queda. Os resultados numéricos confirmam o bom desempenho da nova metodologia proposta, visto que, obtém uma melhor exploração comparativamente a uma metodologia baseada em optimização linear, com um tempo de computação reduzido.

Referências

- [1] J.P.S. Catalão, *Novas Metodologias de Optimização em Sistemas de Energia Hidrotérmicos*, Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Dezembro 2006.
- [2] S.M. Amado e C.C. Ribeiro, "Short-term generation scheduling of hydraulic multi-reservoir multi-area interconnected systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. PWR-2, No. 3, pp. 758-763, August 1987.
- [3] E.B. Hreinsson, "Optimal short term operation of a purely hydroelectric system," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 3, No. 3, pp. 1072-1077, August 1988.
- [4] M. Piekutowski, T. Litwinowicz, e R.J. Frowd, "Optimal short-term scheduling for a large-scale cascaded hydro system," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 9, No. 2, pp. 805-811, May 1994.
- [5] O. Nilsson e D. Sjelvgren, "Mixed-integer programming applied to short-term planning of a hydro-thermal system," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 11, No. 1, pp. 281-286, February 1996.
- [6] A.J. Conejo, J.M. Arroyo, J. Contreras, e F.A. Villamor, "Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 17, No. 4, pp. 1265-1272, November 2002.
- [7] E. Ni, X. Guan, e R. Li, "Scheduling hydrothermal power systems with cascaded and head-dependent reservoirs," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 14, No. 3, pp. 1127-1132, August 1999.
- [8] J.P.S. Catalão, S.J.P.S. Mariano, V.M.F. Mendes, e L.A.F.M. Ferreira, "Parameterisation effect on the behaviour of a head-dependent hydro chain using a nonlinear model," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 76, No. 6-7, pp. 404-412, April 2006.