

# Aproveitamentos Hidroeléctricos com Queda Dependente: Nova Metodologia para a Optimização da Exploração

Sílvio Mariano <sup>(1)</sup>, João Catalão <sup>(1)</sup>, Victor Mendes <sup>(2)</sup> e Marcelino Ferreira <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidade da Beira Interior, R. Fonte do Lameiro 6201-001 Covilhã

<sup>(2)</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Av. Emídio Navarro 1950-062 Lisboa

<sup>(3)</sup> Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa

sm@ubi.pt, catalao@ubi.pt, vfmendes@isel.pt, lmf@ist.utl.pt

---

*Resumo — O aumento da eficiência de exploração dos aproveitamentos hidroeléctricos torna-se uma necessidade premente para as empresas produtoras num mercado eléctrico competitivo. O efeito de queda, tipicamente desprezado ou simplificado em metodologias anteriores baseadas em optimização linear, é de especial relevância nos aproveitamentos a fio de água. Essa é a situação por exemplo no Douro. Assim, esta comunicação propõe uma nova metodologia baseada em optimização não linear para a exploração de aproveitamentos hidroeléctricos com queda dependente, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos.*

*Palavras Chave — Aproveitamentos Hidroeléctricos, Efeito de Queda, Exploração de Recursos, Optimização Não Linear.*

---

## 1. Introdução

O aproveitamento optimizado dos recursos energéticos para produção de energia eléctrica é estrategicamente necessário ao desenvolvimento e ao progresso económico.

Os aproveitamentos hidroeléctricos visam a produção de energia eléctrica a partir da energia potencial da água dos rios que, em regime natural, se dissipa ao longo do leito. Nos aproveitamentos a fio de água a capacidade de armazenamento é pequena, pelo que aproveita a energia dos caudais fluviais em regime natural. Ainda, numa configuração hidráulica em cascata temos reservatórios com aflúencias dependentes do reservatório a montante.

A expansão para novos recursos produtivos, com o objectivo de aumentar a capacidade de produção a que se pode aceder por aproveitamento dos recursos hídricos com viabilidade de exploração, está limitada pelas condições naturais. Na sua grande maioria, os melhores aproveitamentos hidroeléctricos em termos de potência instalada já se encontram realizados, sendo os restantes pouco significativos.

Este facto tem levado a que a cobertura do aumento da procura da energia eléctrica tenha vindo a ser feita pela construção de centrais térmicas. Contudo, as centrais térmicas podem prejudicar acentuadamente o ambiente, estão sujeitas a constrangimentos temporais, e têm custos de funcionamento devido ao custo do combustível.

Os aproveitamentos hidroeléctricos contribuem para a contenção das emissões de gases com efeito de estufa, o que constitui uma vantagem ambiental face às centrais térmicas. Ainda, estes aproveitamentos apresentam uma grande flexibilidade na sua operação, quando explorados convenientemente.

Sob o ponto de vista energético existe uma característica discernível típica dos aproveitamentos hidroeléctricos, derivada da capacidade potencial da aflúencia hídrica ter a sua valorização em termos energéticos dependente da diferença de potencial útil do campo de gravidade e não só em massa como no caso das centrais térmicas, visto que, um mesmo volume significa potencialidades de produção diferentes consoante a altura de queda que caracteriza o recurso — efeito de queda.

Cada aproveitamento hidroeléctrico é caracterizado por uma relação de três variáveis: potência, caudal turbinado e altura de queda. Essa relação é não linear e não convexa. O efeito de queda, tipicamente desprezado ou simplificado em metodologias baseadas em optimização linear, é especialmente relevante nos aproveitamentos a fio de água. Essa é a situação por exemplo no Douro [1].

Uma dificuldade acrescida resulta da dependência não linear da altura de queda em relação ao caudal turbinado, sendo que quanto maior for o caudal turbinado menor será a altura de queda devido à elevação da cota de jusante e diminuição da cota de montante [2].

Assim, esta comunicação propõe uma nova metodologia baseada em optimização não linear para a exploração de aproveitamentos hidroeléctricos com queda dependente, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos.

## 2. Formulação do Problema

A reestruturação do sector eléctrico acarreta a necessidade da existência de maiores exigências de racionalidade e responsabilidade por parte das empresas de produção de energia eléctrica.

A exploração óptima dos recursos energéticos disponíveis representa uma vantagem para as empresas produtoras de energia eléctrica num mercado eléctrico competitivo.

O problema da optimização da exploração de aproveitamentos hidroeléctricos em ambiente competitivo, considerando a disponibilidade de água e as restrições físicas e operacionais de cada recurso, envolve a determinação de uma política que produza uma decisão para os níveis de utilização dos recursos hídricos disponíveis. O objectivo consiste na maximização do valor da produção hidroeléctrica total e, conseqüentemente, do lucro obtido com a venda da energia convertida para a forma eléctrica, durante o horizonte temporal de um ou mais dias até uma semana com resolução horária [3].

A função objectivo a ser maximizada é dada por:

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

A função objectivo dada na equação (1) é composta por dois termos. O primeiro termo representa o lucro obtido com a venda da energia convertida para a forma eléctrica durante o horizonte temporal, em que  $\lambda_k$  é valor previsto para o preço da energia eléctrica na hora  $k$ , e  $p_{kj}$  é a potência entregue pelo central  $j$  na hora  $k$ . O segundo termo expressa o valor futuro,  $\Psi_j$ , da água armazenada nos reservatórios na última hora do horizonte temporal.

O valor óptimo da função objectivo é determinado sujeito a restrições de dois tipos: restrições de igualdade e restrições de desigualdade ou limites simples nas variáveis. As seguintes equações representam as limitações de exploração associadas a cada aproveitamento hidroeléctrico durante o horizonte temporal considerado.

$$v_{kj} = v_{k-1,j} + a_{kj} + q_{k,j-1} + s_{k,j-1} - q_{kj} - s_{kj} \quad (2)$$

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

$$h_{kj} = l_{kj} (v_{kj}) - l_{k,j+1} (v_{k,j+1}) \quad (4)$$

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

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

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

A equação (2) corresponde ao balanço da água em cada reservatório, em que  $v_{kj}$  é o volume de água no reservatório  $j$  no final da hora  $k$ ,  $a_{kj}$  é a afluência ao reservatório  $j$  na hora  $k$ ,  $q_{kj}$  é o caudal de água turbinado proveniente do reservatório  $j$  na hora  $k$ , e  $s_{kj}$  é o caudal de água descarregado pelo reservatório  $j$  na hora  $k$ .

Na equação (3) a potência entregue é considerada uma função do caudal de água turbinado e da eficiência de exploração,  $\eta_{kj}$ , expressa como o quociente entre a potência entregue e o caudal de água turbinado, que por sua vez depende da altura de queda entre reservatórios,  $h_{kj}$ .

Na equação (4) a altura de queda é considerada uma função dos níveis de água nos reservatórios a montante,  $l_{kj}$ , e a jusante,  $l_{k,j+1}$ , que por sua vez dependem dos volumes de água nos reservatórios respectivos.

Na equação (5) impõem-se limites mínimo,  $v_j^{\min}$ , e máximo,  $v_j^{\max}$ , para o volume de água em cada reservatório  $j$ .

Na equação (6) impõem-se também limites, mínimo e máximo, para o caudal de água turbinado. O caudal mínimo de água turbinado,  $q_j^{\min}$ , é considerado nulo, podendo no entanto ser imposto por razões de navegabilidade, recreativas ou ambientais. O caudal máximo de água turbinado,  $q_{kj}^{\max}$ , é considerado dependente da queda.

Na equação (7) considera-se que a descarga de água pelos reservatórios apenas ocorre quando o volume de água possa exceder o seu limite máximo, sendo assim a descarga apenas necessária por razões de segurança.

Os volumes iniciais de água nos reservatórios,  $v_{0j}$ , assim como as afluências aos reservatórios são considerados valores conhecidos. Assume-se também que não existem quaisquer restrições dinâmicas associadas aos aproveitamentos hidroeléctricos, como resultado da sua flexibilidade de operação. Os volumes finais de água nos reservatórios,  $v_{Kj}$ , são restringidos de modo a serem iguais aos volumes iniciais de água nos reservatórios respectivos.

### 3. Metodologia de Optimização

O problema da optimização da exploração de aproveitamentos hidroeléctricos pode ser formulado pelo seguinte problema de optimização não linear:

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

s. a

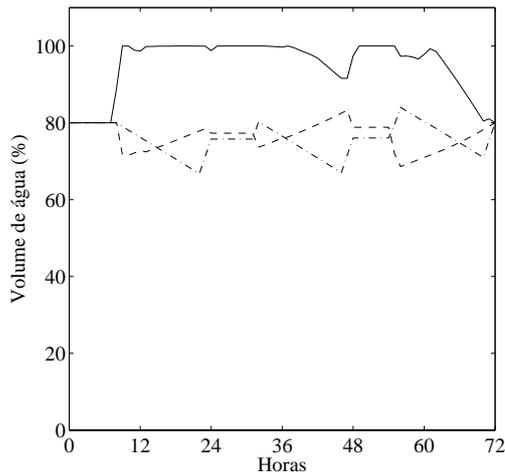
$$\mathbf{b}^{\min} \leq \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}^{\max} \quad (9)$$

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

em que  $\mathbf{x}$  é o vector contendo as variáveis correspondentes aos fluxos dos arcos da rede, variáveis de fluxo, consistindo nos volumes de água, nos caudais de água turbinados e nos caudais de água descarregados, em cada reservatório,  $F(\cdot)$  é uma função não linear do vector das variáveis de fluxo,  $\mathbf{A}$  é a matriz de incidência nodal,  $\mathbf{b}^{\min}$  e  $\mathbf{b}^{\max}$  são os vectores dos limites, mínimos e máximos, das injeções de fluxo nos nós da rede,  $\mathbf{x}^{\min}$  e  $\mathbf{x}^{\max}$  são os vectores dos limites, mínimos e máximos, associados às variáveis de fluxo.

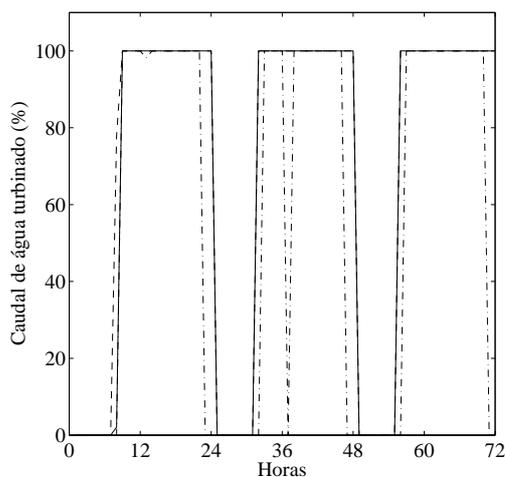
A equação (8) corresponde à maximização de uma função não linear, identificável como uma função de lucro.



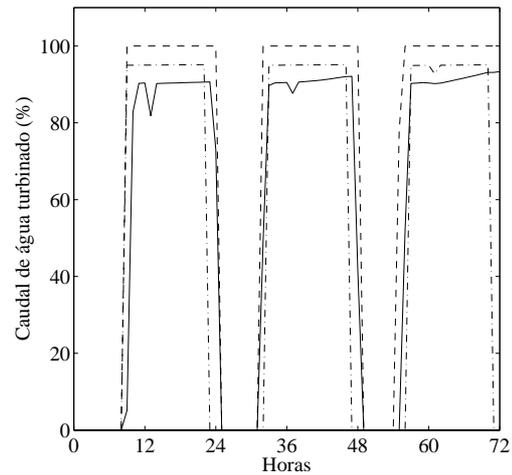


**Fig. 4.** Volume de água nos reservatórios, em percentagem dos valores máximos, para a nova metodologia baseada em otimização não linear. As linhas a traço cheio, interrompido e ponteadas representam, respectivamente, os resultados para o primeiro, segundo e terceiro reservatórios.

As trajectórias óptimas para o caudal de água turbinado proveniente dos reservatórios são apresentadas: para uma metodologia baseada em otimização linear que ignora o efeito de queda, na Fig.5, e para a nova metodologia baseada em otimização não linear, na Fig.6. O caudal de água turbinado e, conseqüentemente, a potência entregue, segue o perfil de preços da energia eléctrica apresentado na Fig.2, mas devido à consideração do efeito de queda é imposta uma adaptação do perfil. A inclusão do efeito de queda no caudal máximo de água turbinado para a primeira central impõe um perfil inclinado nas horas correspondentes aos preços mais elevados, em vez do perfil liso tradicional obtido quando o caudal máximo é considerado constante. Este efeito é, contudo, menos importante nas outras duas centrais, onde se mantém um perfil quase liso.



**Fig. 5.** Caudais de água turbinados provenientes dos reservatórios, em percentagem dos valores máximos, para a metodologia baseada em otimização linear. As linhas a traço cheio, interrompido e ponteadas representam, respectivamente, os resultados para o primeiro, segundo e terceiro reservatórios.



**Fig. 6.** Caudais de água turbinados provenientes dos reservatórios, em percentagem dos valores máximos, para a nova metodologia baseada em otimização não linear. As linhas a traço cheio, interrompido e ponteadas representam, respectivamente, os resultados para o primeiro, segundo e terceiro reservatórios.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos com cada metodologia de optimização.

**Tabela. 1.** Resultados comparativos obtidos

Optimização	Lucro (\$)	% Aumento	Tempo (s)
Linear	2612671	–	0.86
Não Linear	2752834	5.36	2.73

Assim, com a nova metodologia baseada em otimização não linear obtém-se um lucro superior, com um tempo de computação adicional reduzido.

## 5. Conclusão

Os resultados numéricos obtidos confirmam a proficiência da nova metodologia proposta para a optimização da exploração de aproveitamentos hidroeléctricos com queda dependente. O aumento do lucro é da ordem de 5%, em relação a uma metodologia que ignora o efeito de queda, para um tempo de computação adicional reduzido.

## Referências

- [1] M. Ferreira, S. Mariano, J. Catalão, V. Mendes, "Aspectos mais relevantes da optimização hídrica em Portugal", *Actas do IST Forum Energia Outono 04*, Lisboa, Portugal, Dezembro 2004.
- [2] S. Mariano, J. Catalão, V. Mendes, L. Ferreira, "Power generation efficiency improvement in cascaded and head-dependent reservoirs", *Proc. of PSCC'05*, Liege, Belgium, Agosto 2005.
- [3] J.P.S. Catalão, S.J.P.S. Mariano, V.M.F. Mendes, L.A.F.M. Ferreira, "Parameterisation effect on the behaviour of a head-dependent hydro chain using a nonlinear model", *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, No. 6-7, pp. 404-412, Abril 2006.