

EFEITOS INDUZIDOS PELO COMPORTAMENTO DINÂMICO EM CENTRAIS DO TIPO PÉ DE BARRAGEM

Helena RAMOS¹; A. Betâmio de ALMEIDA²

RESUMO

Em centrais do tipo pé de barragem a variação de caudal por embalamento e as flutuações do nível de água em câmaras de carga a montante dos grupos e em canais de restituição irão condicionar o dimensionamento dos órgãos hidráulicos, nomeadamente a altura dos muros dos canais e a largura dos órgãos de descarga. Induzido pela instabilidade transitória os mecanismos de controlo do sistema podem ter uma resposta dinâmica com efeitos de retroacção, nomeadamente os associados a fenómenos de ressonância hidráulica. É importante visualizar o comportamento dinâmico do sistema quando equipado com turbinas do tipo reacção, para diferentes pontos de funcionamento (cargas a montante do grupo e velocidades de rotação), no que diz respeito à influência no valor do caudal turbinado para duas rodas Francis (uma lenta e outra rápida). A caracterização das condições de fronteira são fundamentais para uma correcta quantificação da queda útil em centrais deste tipo.

Palavras chave: centrais pé de barragem, comportamento dinâmico, variação da queda útil

¹ Prof. Auxiliar do IST, UTL, Lisboa, Portugal

² Prof. Catedrático do IST, UTL, Lisboa, Portugal

1- INTRODUÇÃO

Em pequenos aproveitamentos hidroeléctricos, equipados com turbinas de reacção de pequena inércia, a variação de caudal por embalamiento é, em alguns casos, o factor condicionante na análise das pressões máximas ou mínimas transitórias, em particular, no caso de circuitos hidráulicos longos em pressão, ou no caso de circuitos mistos, relativamente às flutuações do nível de água em canais de adução e câmaras de carga e em canais de restituição. Em centrais pé de barragem com funcionamento análogo às instalações do tipo caixa aberta, este fenómeno irá condicionar o dimensionamento dos órgãos hidráulicos e os sistemas de automatismo e controlo.

Por conseguinte, no canal de restituição as variações de caudal a jusante são importantes para a quantificação do valor da queda útil.

2- ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Foram realizadas algumas análises de sensibilidade ao comportamento dinâmico de duas rodas Francis (lenta e rápida) numa instalação experimental mini-hídrica construída em caixa aberta no DECivil do IST à escala 1/10, para quedas máximas em protótipo até 5m. Este tipo de instalação tem um funcionamento em circuito fechado e foi concebido por forma a satisfazer as seguintes condições de funcionamento: 1) condições semelhantes para rodas diferentes; 2) condições impostas por cada roda a cada situação de análise. Estes condicionalismos levaram a que se dimensionasse a instalação com distribuidor fixo por maior simplicidade, facilitando a permuta das rodas sem grandes dificuldades e se estabelecessem novas condições de funcionamento sempre que assim se desejar.

Efectuaram-se séries de ensaios com variação do nível sobre a turbina (carga a montante) e da velocidade de rotação, que deram origem às curvas de vazão representadas nas Figuras 1 e 2. Para as condições de funcionamento adoptadas para os primeiros ensaios (Figura 1 - roda Francis lenta), pode concluir-se, por exemplo, que para velocidades de rotação da ordem de 800 r.p.m. e para cargas inferiores a 0,3 m, o caudal turbinado é nulo, verificando-se experimentalmente que o caudal que alimenta a instalação é todo ele descarregado.

Atendendo à elevada velocidade de rotação da turbina e à configuração da roda parece poder afirmar-se, que existe como que um efeito de bloqueio (ou efeito de parede) nas rodas lentas que impede, nestas condições, a passagem de caudal através da roda. Este efeito é atenuado com o aumento do número específico de rotação associado a cada roda.

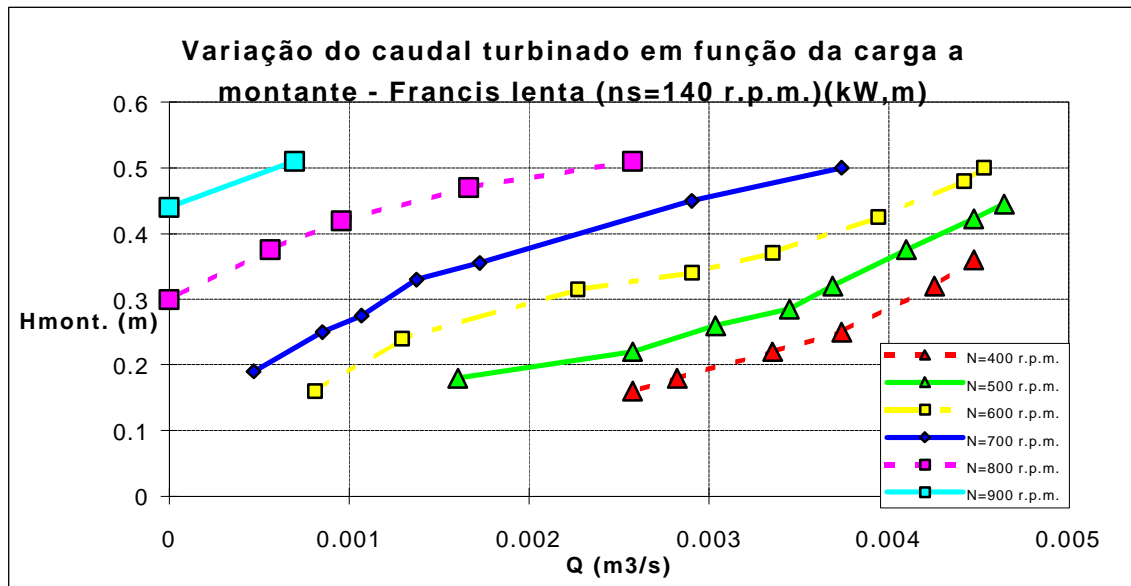


Figura 1 - Instalação experimental de uma turbina Francis lenta. Variação de caudal em função da carga sobre a turbina e da velocidade de rotação

Na Figura 2 verifica-se que a roda da turbina Francis rápida tem menor sensibilidade à variação de caudal relativamente à variação da velocidade de rotação, contrariamente ao que acontece com a roda Francis lenta (Figura 1).

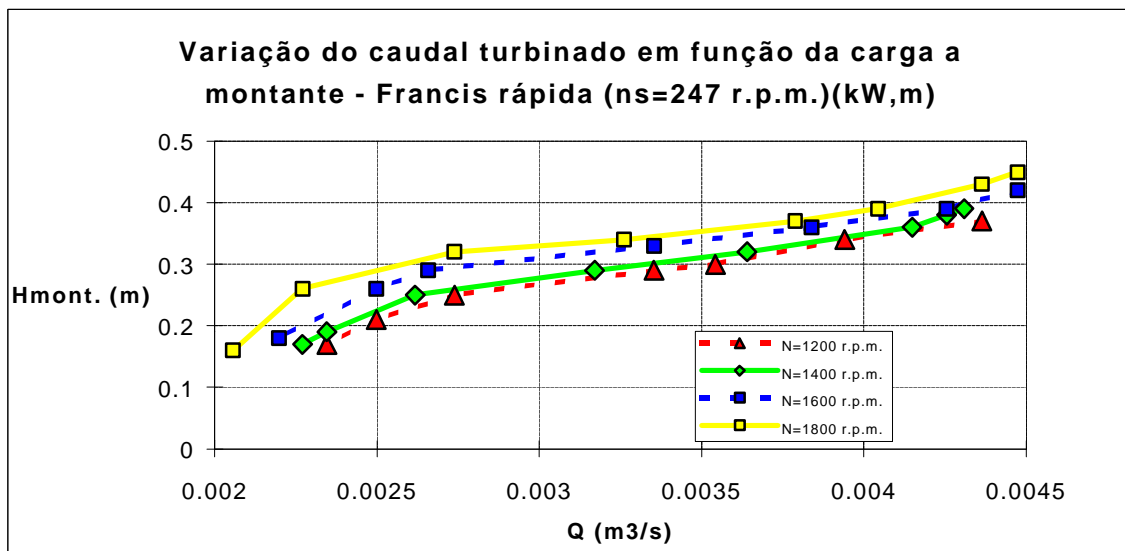


Figura 2 - Instalação experimental de uma turbina Francis rápida em caixa aberta. Variação de caudal com a velocidade de rotação e com a carga sobre a turbina

3- VARIAÇÃO DE CAUDAL E POTÊNCIA. TIPOS DE REGULAÇÃO

- *Regulação controlada na turbina (distribuidor e pás da roda)*

Numa turbina do tipo reacção, a função principal do distribuidor consiste em regular o caudal e a potência da turbina. Seja α_0 o ângulo de saída da velocidade absoluta (V_0) no distribuidor e b_0 a altura das pás do distribuidor e o ângulo de saída das pás da roda β_2 e que $Q=f(b_0, \beta_2, H_u, \alpha_0, \omega)$, conclui-se que a diminuição do caudal pode ser conseguida pela diminuição de b_0 , α_0 ou β_2 e o aumento do caudal pelo aumento dos valores destes parâmetros. No entanto, estando b_0 directamente relacionado com a altura da roda e sendo uma característica específica de cada roda, dificilmente será alterado. Deste modo, no que diz respeito à regulação do grupo, mantendo a velocidade de rotação constante ($\omega=\text{constante}$), a variação do caudal pode obter-se por um dos três procedimentos seguintes:

- 1 - variação do ângulo α_0 ;
- 2 - variação simultânea dos ângulos α_0 e β_2 ;
- 3 - variação do ângulo β_2 .

O procedimento 1 é utilizado para regular o caudal em turbinas do tipo reacção (e.g. Francis e hélice) através do distribuidor. O procedimento 2 é utilizado nas turbinas Kaplan e o procedimento 3 utiliza-se nas turbinas de tipo Kaplan com distribuidor fixo.

A regulação do caudal permite, simultaneamente, a regulação de potência no veio do grupo. A actuação do distribuidor como regulador de potência provoca variações de caudal que, associadas às variações transitórias da queda útil e do rendimento devidas à ocorrência de flutuações dos níveis e, pela alteração de velocidade de rotação do grupo provocada pelo desequilíbrio dos binários actuantes na roda, conduz a um processo de regulação com retroacção.

Em pequenos aproveitamentos quando ligados à rede nacional, a estabilidade desta regulação não coloca, em geral, problemas delicados. No entanto, as variações de caudal turbinado provocam variações significativas nas curvas de vazão quer a montante, quer a jusante dos grupos, que vão influenciar o valor da queda útil e o controlo da estabilidade transitória hidráulica (ocorrência de eventuais fenómenos de ressonância).

- Regulação condicionada pelo nível a montante dos grupos (regulador do tipo PID)

Considerando um regulador de nível do tipo PID (Proporcional, Integral e Diferencial) o caudal turbinado passa a ser função do desvio do nível em relação ao nível de regulação, do integral do desvio ao longo do tempo e da respectiva taxa de variação. Deste modo, a equação de regulação é dada por

$$q(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

com

$$q(t) = \frac{Q_T(t) - Q_r}{Q_r} \quad (2)$$

e

$$e(t) = \frac{N(t) - N_{reg}}{N_{reg}} \quad (3)$$

sendo

- $Q(t)$ - caudal turbinado em função do tempo;
- $N(t)$ - nível da superfície livre em função do tempo;
- Q_r - caudal de referência;

N_{reg} - nível de regulação na câmara de carga;
 K_p - ganho proporcional do regulador de nível;
 K_i - ganho integral do regulador de nível ($K_i = K_p/T_i$);
 K_d - ganho diferencial do regulador de nível ($K_d = K_p.T_d$);
 T_i - tempo integral do regulador de nível;
 T_d - tempo diferencial do regulador de nível.

Assim, de um modo simplificado, obtém-se a variação do nível na câmara de carga e a respectiva influência no escoamento no canal.

4- COMPORTAMENTO DINÂMICO E CONDICIONALISMOS DO SISTEMA

Neste estudo faz-se especial referência ao comportamento dinâmico e a alguns condicionalismos relativamente ao funcionamento de pequenos aproveitamentos hidroeléctricos do tipo pé de barragem: a montante dos grupos pode existir variação do nível de água como sejam em tomadas de água de superfície o que corresponde, em termos de formulação matemática, a uma lei de variação de energia específica, ou a consideração de níveis de água aproximadamente constantes controlados por uma comporta de regulação de nível ou por um descarregador lateral, ou por uma lei de variação de caudal através de comporta ou válvula de comando de admissão de água, através de um hidrograma de caudal afluente, ou ainda, por um regulador de nível de água na câmara de carga. Relativamente aos tipos de condições de fronteira mais utilizados para cada situação salientam-se os seguintes:

- Lei de variação de energia específica

A equação que rege o escoamento na tomada de água ou à entrada de um canal de adução (de declive fraco) é a seguinte:

$$H_{alb} = h + \frac{Q^2}{2gS^2} \quad (4)$$

sendo:

H_{alb} - a energia disponível na albufeira;
 h - a altura de escoamento à entrada no canal;
 S - a secção transversal do canal.

- Comporta ou descarregador para manter nível constante

É usual a instalação de comportas ou de descarregadores uma vez que permitem, com boa fiabilidade, o controlo automático do caudal derivado face à variação do caudal afluente. Para a modelação deste tipo de fronteira admitem-se as seguintes hipóteses simplificativas:

- a altura cinética na câmara de tranquilização onde se localiza a comporta ou o descarregador é desprezável;
- e a capacidade de armazenamento também é desprezável.

Deste modo, o nível de regulação coincide com a energia disponível do escoamento à entrada da tomada e é inversamente proporcional ao caudal, ou seja toma um valor máximo para um caudal turbinado nulo e um valor mínimo para o caudal máximo derivado:

$$N_{reg} = N_{max} - \frac{Q}{Q_{max}} (N_{max} - N_{min}) \quad (5)$$

- *Comporta ou válvula de comando ou hidrograma de caudal afluente*

Para este tipo de condição de fronteira a modelação é feita de forma simplificada em que a lei de variação de caudal é fornecida por uma lei de variação de caudal (Q) em função do tempo (t).

- *Lei de variação do caudal turbinado para a situação for a do ponto de normal funcionamento*

Em função do tipo de roda da turbina de reacção (dependente do valor de n_s associado a cada roda), diferentes tipos de variação de caudal poderão ser considerados, como se verifica neste estudo.

- *Câmara de carga com descarregador lateral*

A câmara de carga é um órgão hidráulico para estabélização do escoamento e que no caso de uma central do tipo pé de barragem pode coincidir com a respectiva albufeira e que se localiza a montante da conduta forçada ou dos grupos e que tem por funções principais: 1) limitar as oscilações de nível decorrentes de variações do caudal turbinado; 2) possibilitar um certo armazenamento; 3) assegurar condições de instalação da tomada de água para a conduta forçada, garantindo a submergência mínima, e dos respectivos equipamentos hidromecânicos, assim como grelha, limpa-grelhas, detectores de nível e comporta de descarga de fundo.

Este órgão pode ser assemelhado a um reservatório de superfície horizontal e as oscilações de nível podem ser calculadas por aplicação da equação global da continuidade,

$$\frac{dN_{cc}}{dt} = \frac{(Q_e - Q_s)}{A_{cc}} \quad (6)$$

sendo

N_{cc} - nível da superfície livre na câmara de carga;

Q_e - caudal à entrada da câmara de carga;

Q_s - caudal à saída da câmara de carga;

A_{cc} - área em planta da câmara de carga.

Para o caso de se considerar um descarregador de superfície na câmara de carga a respectiva lei de vazão será dada por

$$Q_d = C_v L \sqrt{2g} (N_{cc} - N_d)^{3/2} \quad (7)$$

sendo

Q_d - caudal escoado sobre o descarregador;

C_v - coeficiente de vazão;

L - comprimento da crista do descarregador;
g - aceleração da gravidade;
 N_d - cota da crista do descarregador.

Sendo o caudal que sai da câmara de carga dado por

$$Q_s = Q_T + Q_d \quad (8)$$

em que Q_T é o caudal turbinado.

Em seguida apresentam-se resultados da análise dinâmica relativamente ao comportamento verificado a montante dos grupos e da resposta típica de uma turbina do tipo Francis lenta. Na Figura 3 visualiza-se a actuação do regulador por forma a que o nível na câmara de carga não atinja valores inferiores ao nível mínimo de exploração para a situação correspondente à entrada do grupo em funcionamento a plena carga.

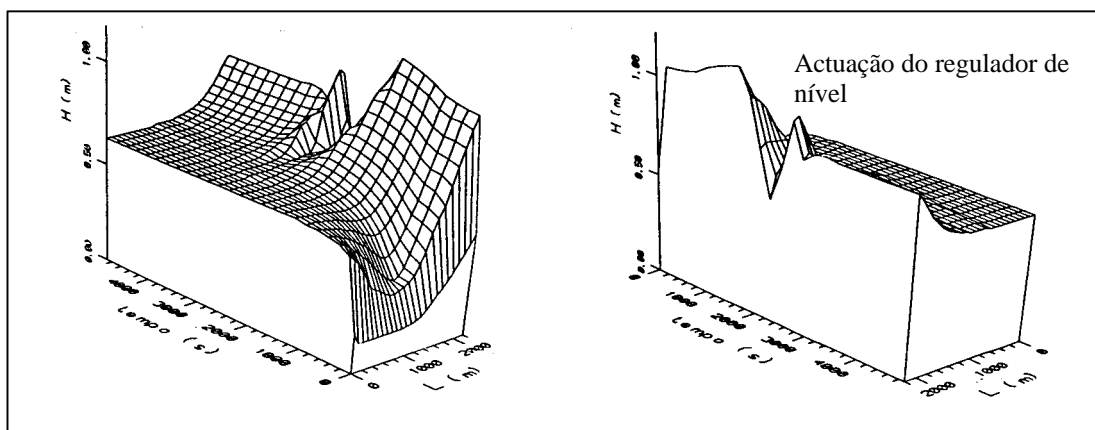


Figura 3 - Variação da altura de escoamento a montante dos grupos por actuação do regulador de nível

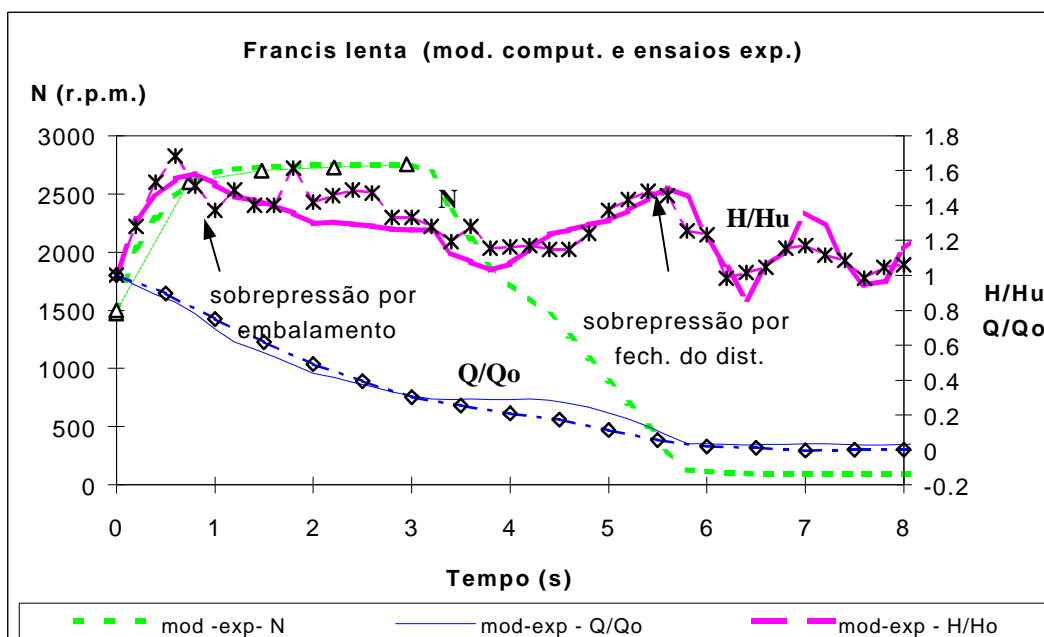


Figura 4 – Análise dos regimes transitórios provocados pela saída de serviço de um grupo Francis lento com fechamento simultâneo do distribuidor

Na Figura 4 pode visualizar-se o efeito induzido, junto à turbina, da variação de caudal e cota piezométrica para as condições de embalamento com fechamento simultâneo do distribuidor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B. and KOELLE, E. - *Fluid Transients in Pipe Networks*. C.M.P., Elsevier, 1992.

ALMEIDA, A. B. and RAMOS, H. - *Hydraulic Transients in SHP Systems*. ESHA (European Small Hydropower Association) N° 17, pp 34-37 - 1996.

FAZALARE, R. W. - *Five Technical Recommendations for Hydro Machinery*. Water Power and Dam Construction, August 1991.

JACOB, Th. - *Similitudes in Stability of Operation Tests for Francis Turbines*. Hydropower & Dams, January, 1994.

PINHEIRO, A. N. - *Canais de Derivação de Pequenos Aproveitamentos Hidrelétricos. Dimensionamento Hidráulico e simulação de Escoamentos Transitórios*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Janeiro de 1989.

PIQUEIRO, F. M. O. - *Efeito da Regulação e da Forma e Dimensões da Câmara de Carga na Produtibilidade Energética de um Pequeno Aproveitamento Hidroelétrico*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho, 1991.

QUINTELA, A. C. - *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian (2o edição) Lisboa, 1981.

RAMOS, H - *Simulação e Controlo de Transitórios Hidráulicos em Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos. Modelação e Análise dos Efeitos Induzidos pela Sobrevelocidade de Turbo geradores* (tese de doutoramento). Lisboa, Junho, 1995.

RAMOS, H. and ALMEIDA, A.B. - *Modelling and Practical Analysis of the Transient Overspeed Effect of Small Francis Turbines*. XVIII IAHR Symposium - Hydraulic Machinery and Cavitation. Valência, Spain: 16th-19th, September, 1996.

RAMOS, H. and ALMEIDA, A.B. - *Hydrotransients Induced By Dynamic Behaviour of Turbo-Generators at Small Hydroelectric Power Plants - Pressure Surges and Fluid Transients* - Harrogate, England - pp 417 - 429 BHR Group April, 1996.