

Caracterização Dinâmica Global do Funcionamento de Aproveitamentos Hidroeléctricos

Helena Ramos

Engenheira Civil, Professora Auxiliar
Instituto Superior Técnico
Fax: +351 1 8497650 e-mail: hr@civil.ist.utl.pt
Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal

A. Betâmio de Almeida

Engenheiro Civil, Professor Catedrático
Instituto Superior Técnico
Fax: +351 1 8497650 e-mail: aba@civil.ist.utl.pt
Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal

Resumo

Com o objectivo de obter a resposta dinâmica de um sistema, para uma melhor exploração automatizada e optimização das condições de segurança e de rentabilidade de uma central hidroeléctrica, nomeadamente concepção e programação de autómatos, é necessário conhecer as constantes características. A obtenção do atraso na resposta do transitório até atingir o regime permanente ou estacionário seguinte é condicionante para a definição eficaz da operacionalidade de um sistema.

A influência da resposta dos diferentes componentes, que ao interagirem entre si, provocam ondas reflectidas, que se sobrepõem e originam instabilidades, que poderão condicionar a eficaz operacionalidade do sistema. Num pequeno aproveitamento a fio de água a demora provocada pelo tempo de resposta, após a paragem e o sucessivo arranque, pode influenciar fortemente a produção energética, condicionando a respectiva viabilidade do empreendimento.

Palavras chave: caracterização dinâmica, aproveitamentos hidroeléctricos, resposta dinâmica, operacionalidade do sistema

1- Introdução

O problema dos transitórios em circuitos hidráulicos, em particular no caso de circuitos longos, é de grande importância no projecto de sistemas hidroeléctricos equipados com grupos de inércia reduzida. Este tipo de análise sempre constituiu uma preocupação constante do engenheiro civil por razões que se prendem com a segurança e estabilidade do sistema.

O desenvolvimento de novas técnicas de simulação verificadas através de comparações com funcionamento em protótipo, permite avaliar o comportamento dinâmico individual de cada componente, assim como obter a respectiva interacção daí resultante. Variações de caudal, sejam do tipo arranque ou paragem dos grupos, manobras em válvulas e comportas, variações de carga e velocidade, conduzem a regimes transitórios que irão influenciar a resposta e operacionalidade do sistema de acordo com determinadas constantes características de cada tipo de instalação.

2- Constantes características

Em sistemas hidroeléctricos cujo circuito hidráulico é, fundamentalmente, constituído por uma conduta ou galeria e por um órgão de controlo de caudal (e.g. válvulas e/ou grupos turbo-geradores) as análises de sensibilidade demonstraram que o comportamento dinâmico pode ser caracterizado pelas seguintes constantes características:

Tempo de inércia rígida da coluna líquida

$$T_w = \frac{LV}{gH} \quad (1)$$

corresponde ao intervalo de tempo que a coluna líquida rígida leva a atingir a velocidade V quando submetida a uma diferença de cotas piezométricas H .

Tempo de reflexão elástica

$$T_E = \frac{2L}{c} \quad (2)$$

corresponde ao tempo necessário para que uma onda que parta da extremidade de jusante se propague para montante e volte à mesma secção percorrendo $2L$ com a velocidade de propagação c .

Tempo de inércia mecânica ou de lançamento do grupo

$$T_m = \frac{PD^2 N^2}{3575 P} 10^{-3} \quad (3)$$

corresponde ao tempo que leva o grupo a atingir a velocidade de rotação nominal N quando submetido a uma potência hidráulica P linear crescente com uma massa inercial de $PD^2=4gI$.

Parâmetro característico da conduta

$$\bar{\rho} = \frac{cV}{gH} = \frac{2T_w}{T_E} \quad (4)$$

caracteriza a influência dos efeitos da propagação das ondas elásticas de pressão ao longo da conduta.

Para a chaminé de equilíbrio o *coeficiente de compensação energética*

$$\lambda_{ch} = \frac{gH^2 A_{ch}}{LAV^2} \quad (5)$$

e para o reservatório hidropneumático

$$\lambda_{rh} = \frac{2gHV}{LAV^2} \quad (6)$$

que são importantes indicadores da maior ou menor capacidade de absorção das ondas elásticas (e.g. quanto maior o valor atingido por este parâmetro maior o amortecimento conseguido e conseqüentemente mais fácil será o controlo do sistema).

Para estruturas de controlo de caudal com saída para a atmosfera, o circuito hidráulico fica desacoplado de jusante. Deste modo, o transitório será unicamente condicionado pela lei de variação de caudal sendo o *parâmetro característico* mais significativo

$$\frac{\Delta H}{V^2/2g} = \frac{fL}{D} \quad (7)$$

que quanto menor for o valor deste parâmetro mais linear será a variação de caudal, tendendo a igualar a duração da manobra ao tempo efectivo de variação de caudal.

Número específico de rotações

$$n_s = N \frac{\sqrt{P}}{H^{1,25}} \quad (8)$$

é um indicador do comportamento dinâmico de cada tipo de roda de turbina (baixos valores de n_s correspondem a rodas lentas e elevados valores de n_s a rodas rápidas). Pode conseguir-se a variação de n_s por forma a adaptá-lo às condições de funcionamento mediante a colocação de rodas em paralelo ou em série.

3- Interação entre componentes do sistema

3.1- Sistema integrado

As características de resposta integrada dos diferentes sub-sistemas dependem do tipo de perturbação ou excitação a que estão sujeitos. A interacção das diferentes fontes de excitação no sistema global induz comportamentos oscilatórios com períodos diferentes que podem originar por um lado amortecimentos rápidos ou, doutro modo, amplificações que, no limite, podem degenerar em eventuais anomalias ou até mesmo em acidentes.

No sistema hidroeléctrico distinguem-se vários elementos que se podem associar em duas componentes fundamentais, caracterizadas por constantes de tempo de grandeza diferente (Figura 1):

- A) **Componente hidráulica** que inclui: as variações de nível na albufeira (se existir) ou no nível de água no açude; a propagação das ondas transmitidas ao circuito de baixa pressão; o amortecimento das ondas transmitidas aos dispositivos de protecção (se existirem); a propagação das ondas incidentes e reflectidas na conduta forçada; a origem de perturbações em órgão reguladores (e.g. válvulas e turbinas) – conduz à propagação de ondas com períodos da ordem de segundos a minutos.
- B) **Componente eléctrica** que inclui: a resposta dinâmica do gerador (e.g. estabilidade transitória por variações de carga e de velocidade); reconversão no transformador da subestação da energia eléctrica produzida, para posterior ligação à rede; fluxo de energia na linha de transmissão sujeita a rápidas variações induzidas por variação do pedido da rede e de fornecimento, conduzindo este desequilíbrio a flutuações de frequência (i.e. interrelação carga-frequência) – originando a propagação de ondas com períodos da ordem de milisegundos nas linhas de transmissão (e.g. por curto-circuito e descargas atmosféricas ou mudanças repentinas de funcionamento) ou da ordem de fracções de segundo (e.g. estabilidade transitória por oscilações mecânicas dos rotores de máquinas síncronas).

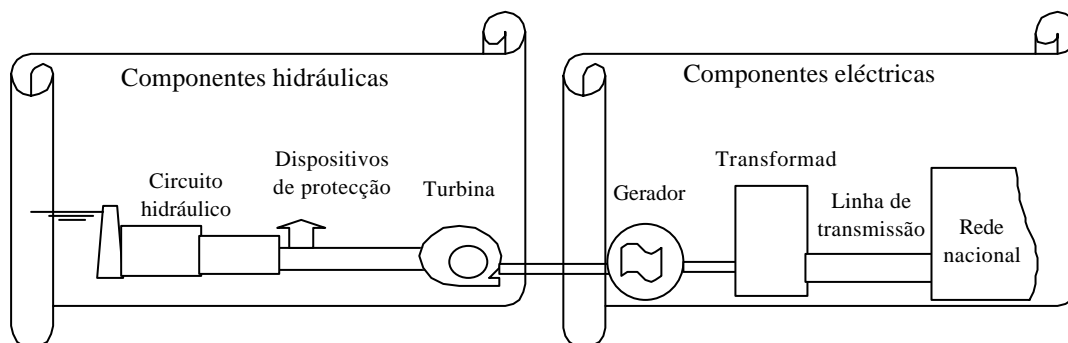


Fig. 1 – Interação entre os diferentes componentes do sistema hidroeléctrico com diferentes tempos de resposta

3.2- Caracterização dinâmica dos principais elementos

Antes de conhecer a resposta do sistema global é importante conhecer a resposta típica de cada componente. Relativamente à caracterização dinâmica dos principais elementos constituintes de uma instalação hidroeléctrica, salientam-se: 1) os efeitos benéficos dos dispositivos de protecção, no atraso da velocidade de propagação das ondas de pressão e respectivo amortecimento, conduzindo a uma maior estabilidade do sistema; 2) a influência do aprisionamento de ar em condutas por mau funcionamento de ventosas aquando do enchimento da conduta que, dependendo do seu volume, poderá ter um efeito amplificador ou dissipativo das ondas de pressão; 3) a estabilidade do gerador que pode transmitir efeitos de retroacção à turbina e regulador induzindo instabilidades nos níveis da tomada de água e caudais turbinados; 4) as manobras em órgãos de controlo de caudal e em turbinas que conduzam a instabilidades transitórias que se propagam ao longo do circuito hidráulico.

Influência de um órgão com capacidade de armazenamento

Em circuitos com dispositivos de protecção baseados na capacidade de armazenamento energético transitório pode observar-se o efeito benéfico da colocação de uma câmara de sedimentação no início do circuito hidráulico, com vista à protecção contra a entrada e adução de material sólido (Figura 2). O efeito é semelhante à instalação de uma chaminé de equilíbrio ou reservatório hidropneumático cujo objectivo principal consiste no amortecimento das pressões máximas.

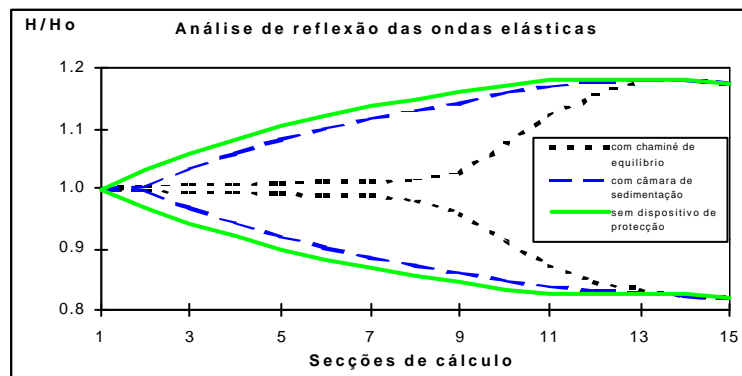


Fig. 2 – Influência de um dispositivo de protecção na reflexão das ondas elásticas

Dependendo da dimensão deste tipo de componente, assim depende o amortecimento das flutuações de pressão motivadas por manobras na central, e a consequente diminuição da reflexão das ondas elásticas verificadas ao longo do circuito hidráulico.

Aprisionamento de ar em condutas

O caso de roptura da conduta (e.g. desençaixe de uma das curvas) por cedência de um dos apoios provocados pela existência de desequilíbrio de forças devido à redução de celeridade pela presença de ar na conduta, provoca uma frente de onda que se propaga com celeridades diferentes (antes e na bolha de ar), permanecendo durante algum tempo uma diferença de pressão transitória (e.g. Sines mas por ocorrência de cavitação). Consoante o valor do volume de ar contido na conduta pode ter-se uma amplificação ou dissipação do valor da pressão, havendo, assim, um valor crítico mínimo que depende das características de cada instalação.

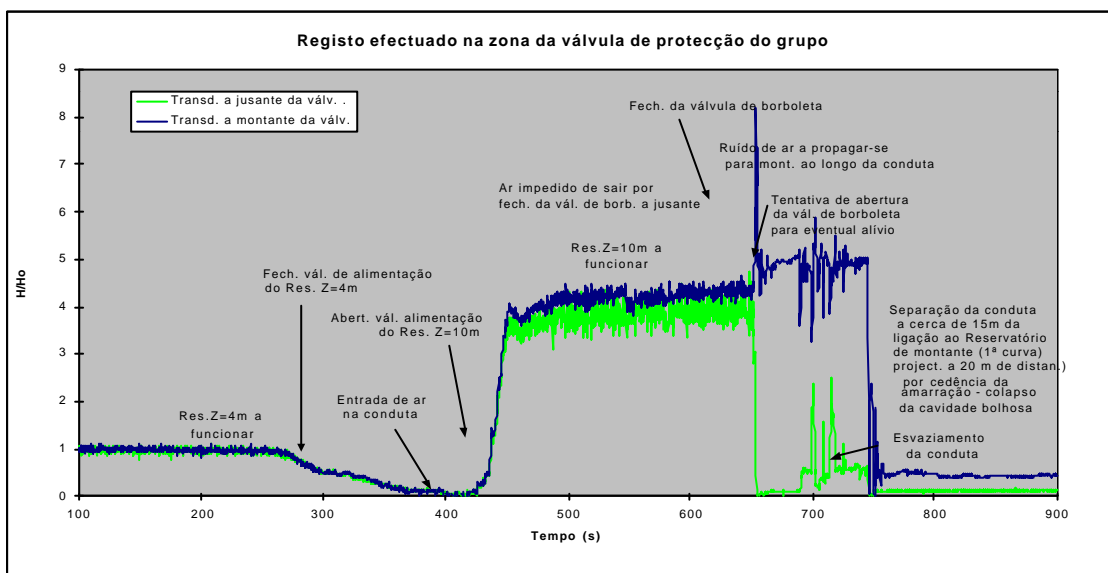


Fig. 3 – Resultados experimentais da análise da ruptura de uma conduta adutora por aprisionamento de ar

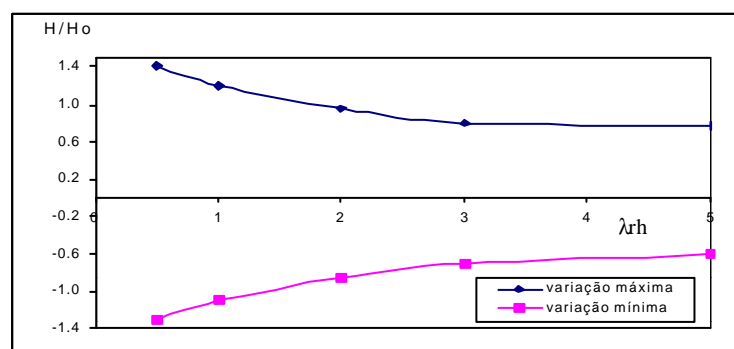


Fig. 4 - Influência do volume de uma bolsa de ar no valor da pressão

Análise da estabilidade de um gerador

A análise da estabilidade para a tomada de carga de um grupo é efectuada no plano de fase $\dot{\delta} - \delta$ (sendo δ o ângulo de potência, dado pela diferença entre o ângulo do rotor e o argumento da tensão no barramento, sempre em relação à referência síncrona).

$$I \frac{d\omega}{dt} + B_{G \max}^t \text{sen}\delta = B_H$$
$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (9)$$

sendo $B_{G \max}^t$ o binário resistente máximo, B_H o binário hidráulico motor, I o momento de inércia polar das massa girantes e ω a velocidade de rotação angular do grupo.

Estando o gerador ligado à rede o ângulo δ poderá variar durante um transitório. Este tipo de análise tem por objectivo verificar se é possível a ligação do grupo à rede de uma forma estável, mesmo para circuito hidráulico muito longo, cuja influência no transitório não é desprezável.

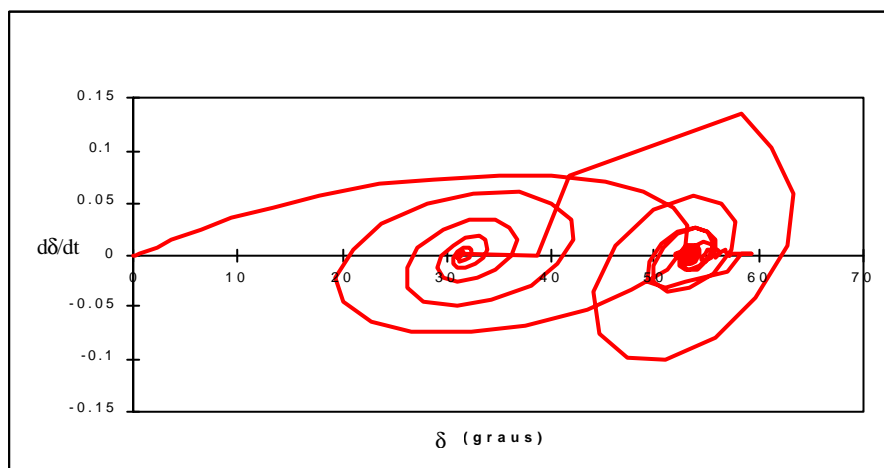


Fig. 5 – Análise da estabilidade transitória do gerador (situação instável $\delta > 45^\circ$ e $T_w/T_m=0,6$)

Durante um transitório as potências motora actuante (PH) e resistente (PG) têm valores diferentes e forçam a variação de δ . Se a estabilidade da variação de δ for verificada, o gerador voltará a encontrar um regime de equilíbrio.

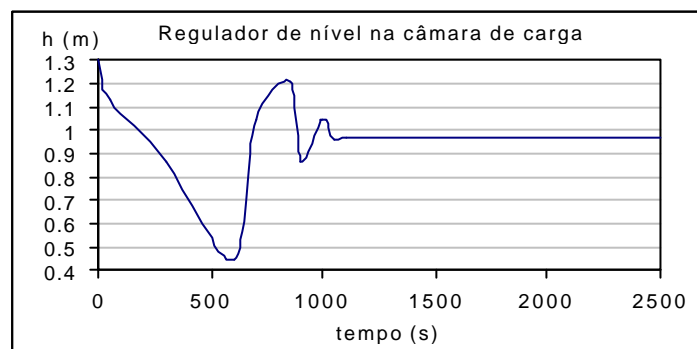
Um dos problemas práticos que podem ocorrer com pequenos turbo-geradores é a eventual dificuldade em estabelecer o sincronismo e a entrada em carga no caso de o circuito ser muito longo. Deste modo, a entrada em carga através da abertura do distribuidor, a variação de PH e de

δ deverá ser verificada. Um critério de estabilidade prático consiste na verificação do valor do ângulo de potência δ que deve ser inferior a 45° . Um aumento de T_w tenderá a dificultar a estabilidade do gerador. A situação estável é obtida para valores da ordem de $T_w/T_m=0,1$. Realça-se a diferença de escalas de tempo características entre os transitórios hidráulicos e os eléctricos na linha de transmissão.

Reguladores (PID)

Os pequenos aproveitamentos, em geral, têm pouca ou nenhuma capacidade de armazenamento, conseguindo-se a maximização da produção energética através do ajustamento do caudal turbinado ao caudal afluente, mediante um sistema de controlo do nível na câmara de carga. A regulação do caudal através de um regulador de nível (e.g. do tipo PID) permite manter o nível acima do mínimo de exploração no órgão de admissão, cuja resposta típica se apresenta na Figura 6, cujo tempo característico no canal de adução com câmara de carga é da ordem de minutos.

Fig. 6 - Resposta típica de um regulador PID no controlo



do nível na câmara de carga em função do caudal turbinado

Manobras na válvula de protecção do grupo

Na Figura 7 pode visualizar-se a resposta típica de uma manobra de fechamento de uma válvula de borboleta instalada a montante do grupo turbo-gerador para protecção do grupo. A lei de variação de caudal é não linear cuja maior variação ocorre nos últimos segundos do fechamento, como se pode verificar na vizinhança da pressão máxima (ver Figura caso de turbinas Pelton).

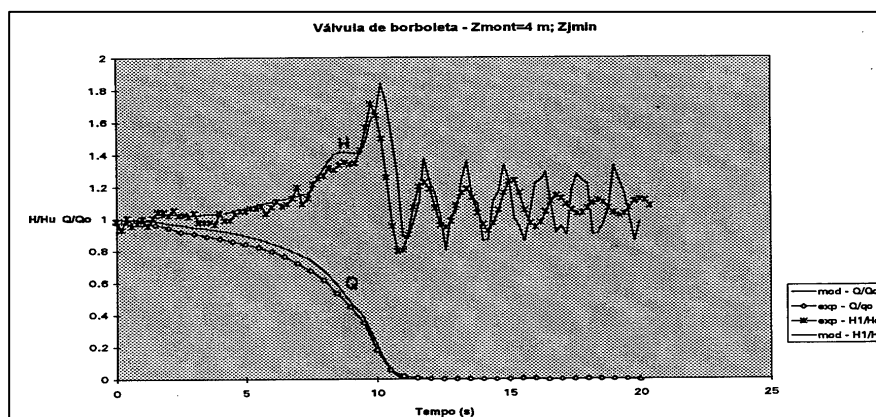


Fig. 7 – Manobra de fechamento na válvula de protecção do grupo turbo-gerador

Manobras de variação de caudal nas turbinas

Turbinas de reacção

Relativamente ao comportamento dos grupos turbo-geradores, os que apresentam maiores problemas ao nível de regulação associados aos transitórios hidráulicos são os do tipo reacção, em particular as turbinas Francis.

Com base em várias simulações efectuadas para pequenos aproveitamentos hidroeléctricos equipados com diferentes turbinas de reacção (e.g. Francis lentas, normais e rápidas e Kaplan) e para diversas características do circuito hidráulico (T_W e T_E), dos grupos (PD^2 e T_m) e diferentes tempos de fechamento do distribuidor (T_F), obtém-se a influência dos diferentes parâmetros característicos (Figura 8).

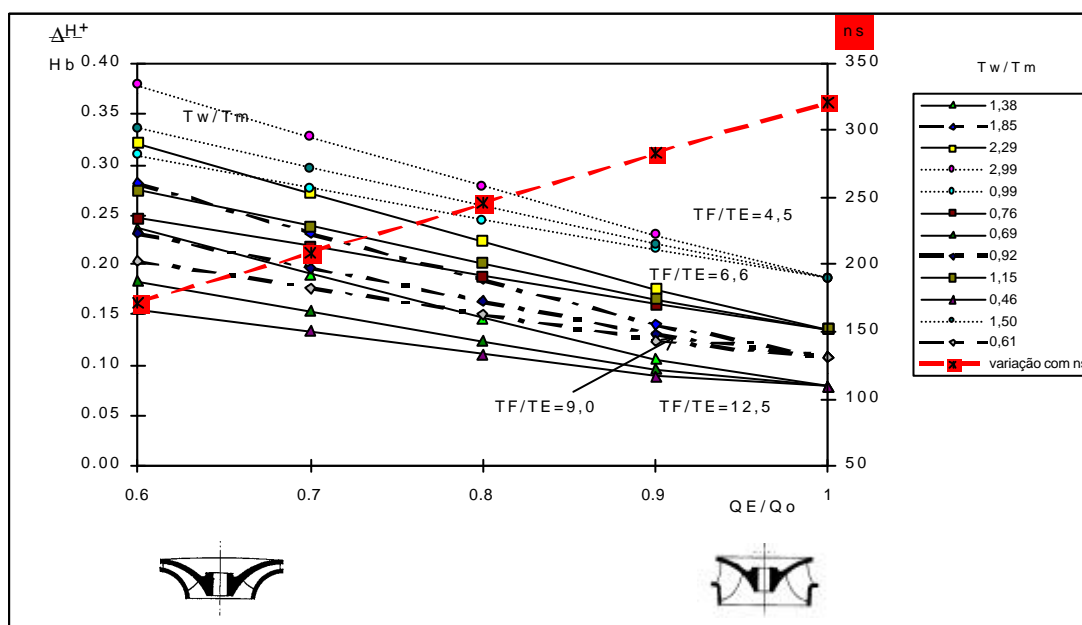


Fig. 8 – Síntese de resultados relativamente aos parâmetros intervenientes na sobrepressão máxima relativa numa instalação hidroeléctrica (RAMOS, 1995)

Com base nesta análise, que se reproduz na Figura 8, pode concluir-se o seguinte:

- para turbinas com elevados valores de η (turbinas de reacção rápidas – Francis rápidas e Kaplan) o corte de caudal por embalamo (Q_E/Q_0) é diminuto ou nulo, sendo a sobrepressão máxima provocada pelo fechamento do distribuidor, cujo valor depende, basicamente, da relação entre o tempo de fechamento do distribuidor e o de reflexão elástica da conduta (T_F/T_E);
- para turbinas com menores valores de η , a sobrepressão máxima passa a ser resultante do efeito da sobrevelocidade transitória, que depende da relação entre o tempo de inércia rígida do circuito e o tempo de lançamento dos grupos (T_W/T_m).

Turbinas de acção

Atendendo às características das turbinas de acção o circuito hidráulico a montante da central ficará condicionado pela lei de variação do caudal imposta pela manobra nos injectores, sendo a análise do regime transitório idêntico ao que ocorre em sistemas gravíticos de adução com controlo de caudal por uma estrutura constituída por válvulas. O parâmetro característico adimensional mais significativo é a relação entre fL/D (sendo f o factor de Darcy-Weisbach, L o comprimento e D o diâmetro da conduta) resultante da equação da energia entre montante e jusante com saída para a atmosfera. Deste modo, o caudal tende a manter-se quase constante e a diminuir abruptamente só para pequenos graus de abertura. Assim, a duração da manobra torna-se muito diferente do tempo efectivo de anulação do caudal, podendo transformar uma manobra teoricamente lenta em rápida (Figura 9).

A análise efectuada (Figura 9) permite afirmar o seguinte:

- elevados valores de fL/D conduzem a reduções de caudal só para pequenos graus de abertura.
- a diminuição da relação fL/D tende a linearizar a lei de variação do caudal em função do grau de abertura.

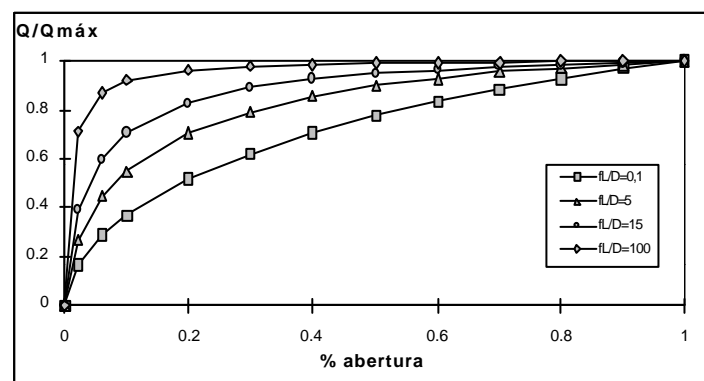


Fig. 9 – Lei de variação do caudal com o grau de abertura de um injector

4- Conclusões

Para a exploração automatizada e a optimização das condições de segurança e de rentabilidade de uma central hidroléctrica é necessário o conhecimento da resposta dinâmica integrada. Admite-se que as turbinas e as comportas não introduzem atrasos de tipo inercial na resposta do sistema (considerando-se desprezável a inércia mecânica dos actuadores). A utilização da constante de tempo dinâmico do circuito hidráulico com base na modelação não linear (do tipo elástico) de parâmetros distribuídos, no domínio no tempo (ou do tipo frequencial), por imposição de uma função do tipo degrau a jusante da conduta forçada (na central), correspondente a uma variação de caudal, permite avaliar a adequada condição de estabilidade que é necessário garantir de modo a não condicionar seriamente a operacionalidade do sistema.

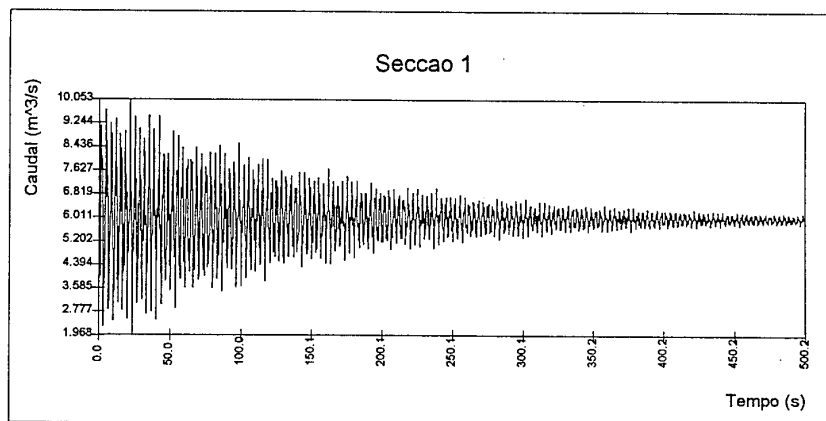


Figura 10 - Resposta dinâmica do circuito hidráulico para uma perturbação em degrau do caudal turbinado $Q=4 \rightarrow 6 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow \Delta Q=50\%$

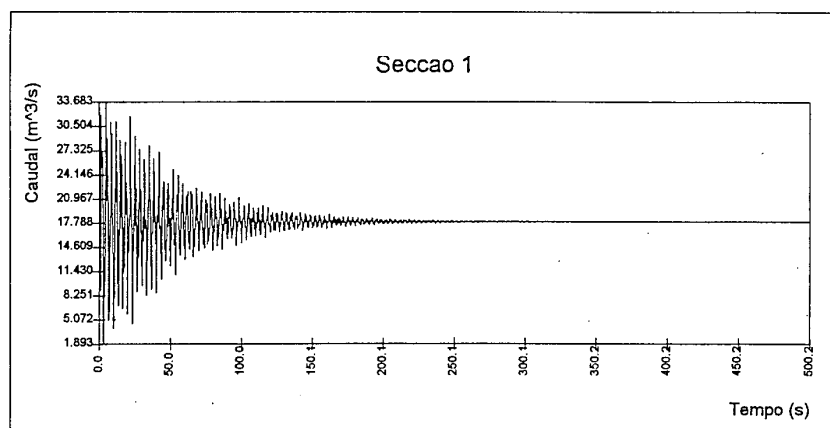


Figura 11 - Resposta dinâmica do circuito hidráulico para uma perturbação em

Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se as respostas da variação do caudal na secção inicial do circuito (junto à albufeira) onde é bem visível o efeito dissipativo. A resposta do circuito é fortemente oscilatória em torno do valor final. No caso de pequenas variações, o amortecimento é mais lento sendo o atraso máximo na resposta em regime permanente ou estacionário, para o caso analisado, da ordem de 9 e 4 minutos, respectivamente para pequenas e grandes variações de caudal turbinado.

Este atraso deve ser tido em consideração na programação do regulador, nomeadamente na fixação do intervalo de tempo entre as sucessivas ordens para regulação dos distribuidores das turbinas, para enchimento do canal de adução e para manobras de arranque e paragem dos grupos ou de ocorrência de eventuais anomalias no sistema.

Simbologia

A - área da secção transversal;
 B_{Gmax}^t - amplitude máxima do binário resistente;
BH - binário hidráulico motor
D - diâmetro da conduta;
H - queda útil;
I - momento de inércia polar das massa girantes;
J - perda de carga unitária;
L - comprimento da conduta;
c - celeridade das ondas elásticas;
f - factor de Darcy-Weisbach;
g - aceleração da gravidade;
N - velocidade de rotação do grupo;
 n_s - número específico de rotações;
P - potência;
Q - caudal;
QE - caudal em situação de embalamento do grupo;
Qo - caudal nominal a plena abertura;
V - velocidade do escoamento;
 \forall - volume de ar no reservatório hidropneumático;
 ΔH - perda de carga contínua na conduta;

δ - ângulo de potência;
 λ_{ch} - coeficiente de compensação energética da chaminé;
 λ_{rh} - coeficiente de compensação energética do reservatório hidropneumático;
 ω - velocidade de rotação angular do grupo.

Bibliografia

Almeida, A. Betâmio; Koelle, E. (1992), *Fluid Transients in Pipe Networks*. Computational Mechanics Publications. Elsevier Applied Science.

Almeida, A. (1985), *Regimes Transitórios em Circuitos Hidroeléctricos*. Curso Intensivo sobre Regimes Hidráulicos Transitórios em Circuitos de Centrais Hidroeléctricas. CEHIDRO, IST, Portugal.

Ramos, H. (1995), *Simulação e Controlo de Transitórios Hidráulicos em Pequenos Aproveitamentos Hidroeléctricos. Modelação e Análise dos Efeitos Induzidos pela Sobrevelocidade de Turbogeneradores*. Tese de doutoramento, Lisboa, Portugal.

Ramos, H; Almeida, A.B. (1998), *Hydraulic Computational Advances in the Design of Small Hydropower Plants*. Seventh International Conference. HYDROSOFT 98. Hydraulic Engineering Software. Computational Mechanics Publications. Como, 16 - 18 September, Italy.

Ramos, H.; Almeida, A.B. (1996), *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.

Ramos, H.; Almeida, A.B. (1996), *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.

