

ESTUDO DE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE MODELOS NÃO LINEARES

OSWALDO H. DE SOUZA JR
Centro de Pesquisa em Eng.
Mecânica - COPEL
Curitiba - PR - Brasil

AFONSO H. MOREIRA SANTOS
Departamento Eng. Mecânica
EFEI
Itajubá - MG - Brasil

SUMÁRIO

O estudo de transitórios faz-se necessário em função de variações de potência e frequência que ocorrem em sistemas hidráulicos. Através de modelo não linear e simulação analógica, estudou-se o fenômeno, obtendo-se resultados satisfatórios se comparados com exemplos da literatura através do método das características bem como exemplos específicos de centrais hidrelétricas.

INTRODUÇÃO:

Transiente ou, transitório hidráulico por Streeter (1978) é usado para descrever um escoamento não permanente de fluidos em tubos, cujas condições em um ponto qualquer variam com o tempo.

Analisaremos os transientes hidráulicos em função de grandes distúrbios que ocorrem em sistemas hidráulicos determinando as pressões e vazões em pontos quaisquer através do método de simulação analógica em modelos não lineares; de fácil aplicação se comparados com os métodos já consagrados. Os resultados apresentam-se satisfatórios com base em exemplos da literatura, resolvidos através do método das características por Streeter (1978) e Chaudry (1979), e de exemplos específicos de turbinas hidráulicas.

CAUSAS DE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS:

Dentre as causas de transitórios hidráulicos destacamos as principais:

- manobras de válvulas;
- alterações de potências nas máquinas hidráulicas;
- instabilidade do sistema de regulação de velocidade;
- instabilidade no tubo de sucção.

CELERIDADE DAS ONDAS DE PRESSÃO:

A celeridade representa a velocidade de propagação do som em um meio fluido infinito com propriedades k e ρ , compressibilidade e massa específica respectivamente:

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (1)$$

Para uma tubulação, um elemento modificador devera ser introduzido no denominador, levando-se em conta o diâmetro, a espessura e o módulo de elasticidade do material:

$$a = \frac{\sqrt{k/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{k \cdot D}{e \cdot E} C_1}} \quad (2)$$

onde C_1 é a constante definida para cada caso de aplicação em condutos, normalmente em tubos cuja relação D/e é maior ou igual a 25, o valor de C_1 é igual a 1.

EQUAÇÕES PARA O ESCOAMENTO TRANSITÓRIO:

Equação do Movimento:

Aplicando-se a segunda lei de Newton em um elemento de fluido dentro de um tubo conforme Streeter (1978), obtém-se a equação diferencial do movimento:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (3)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2), V é a velocidade do escoamento (m/s), f é o fator de atrito, H é a carga de pressão mais a cota (m), e o quarto termo representa a perda de carga do sistema.

Equação da Continuidade:

Aplicando-se a lei de conservação de massa para um determinado volume de controle conforme Streeter (1978), obtém-se a equação diferencial da continuidade, que considera o efeito de compressibilidade da água e o efeito de elasticidade do tubo:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - V \sin \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

onde α é o ângulo de inclinação do tubo a a celeridade. Em ambas as equações (3) e (4) $H(x,t)$ e $V(x,t)$ representam a carga de pressão e velocidade média, e são variáveis dependentes, x (comprimento) e t (tempo) são variáveis independentes.

FORMA SIMPLIFICADA DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

Para o estudo de transitórios hidráulicos é possível desprezar os termos convectivos $V\partial V/\partial x$ e $V\partial H/\partial x$, sem que se comprometa os resultados em função da celeridade apresentar valores elevados. Desprezando-se também o efeito da inclinação do tubo, conseqüentemente eliminando-se o terceiro termo da equação (4) temos:

Equação do Movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f Q |Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (5)$$

Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gA}{a^2} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

As equações (5) e (6) foram expressas em termos de H (carga de pressão) e Q (vazão), D é o diâmetro do tubo e A a área transversal.

FORMA ADIMENSIONAL DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

Equação do Movimento:

Considerando-se as grandezas relativas $\bar{h} = H/H_0$, $\bar{q} = Q/Q_0$ para as derivadas parciais temos:

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{Q_0}{H_0 \cdot gA} \cdot \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{f Q_0^2}{2gDA^2 H_0} \bar{q} |\bar{q}| \quad (7)$$

Para um trecho discretizado da tubulação podemos obter:

$$\Delta \bar{h} = - \frac{Q_0 \cdot \Delta x}{gH_0 A} \cdot \frac{d\bar{q}}{dt} - \frac{f \Delta x Q_0^2}{2gDA^2 H_0} \bar{q} |\bar{q}| \quad (8)$$

onde:

$$L = \frac{Q_0 \Delta x}{gH_0 A} ; \text{chamado inércia} \quad (9)$$

$$R = \frac{f \Delta x Q_0^2}{2gDA^2 H_0} ; \text{chamado resistência} \quad (10)$$

Equação da Continuidade:

Considerando-se as mesmas grandezas relativas para as derivadas parciais temos:

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \frac{H_0 gA}{Q_0 a^2} \cdot \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

Para um mesmo trecho discretizado de tubulação obtemos:

$$\Delta \bar{q} = - \frac{H_0 gA \Delta x}{Q_0 a^2} \frac{d\bar{h}}{dt} = 0 \quad (12)$$

onde:

$$C = \frac{H_0 gA \Delta x}{Q_0 a^2} ; \text{chamado capacitância} \quad (13)$$

ou seja:

$$\Delta \bar{h} = - L \frac{d\bar{q}}{dt} - R \bar{q} |\bar{q}| \quad e \quad (14)$$

$$\Delta \bar{q} = - C \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (15)$$

MODELO PARA SIMULAÇÃO ANALÓGICA:

O circuito analógico para simulação é apresentado para um determinado trecho discretizado da tubulação através de circuito T (Caminha, 1971):

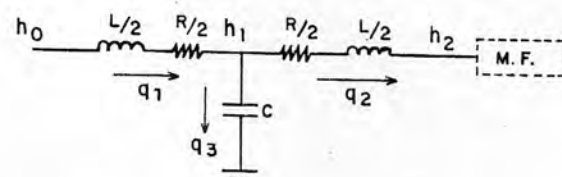


Figura 1 - Circuito analógico

MODELO ANALÓGICO:

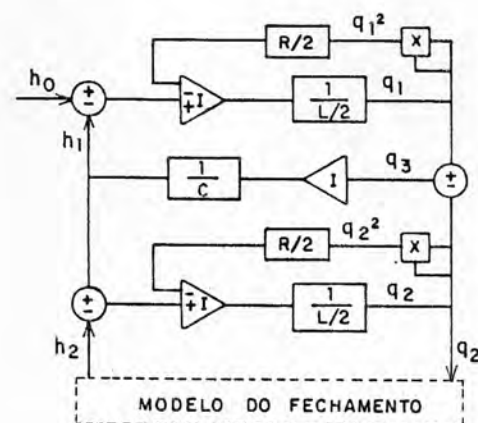


Figura 2 - Modelo analógico básico

MODELO PARA FECHAMENTO:

Um modelo para fechamento de uma válvula ou um sistema distribuidor de uma turbina (inclusive rotor) poderá ser elaborado considerando-se todos os fatores de influência, ou seja, as características da turbina através de seu modelo reduzido. O modelo deste trabalho poderá ser utilizado para uma simples válvula ou para um conjunto distribuidor/rotor de uma turbina Francis Normal, com média rotação específica, e cuja característica de variação de vazão pela variação de frequência $\Delta Q/\Delta f$ apresenta-se praticamente constante (Souza, 1992).

RESULTADO DA SIMULAÇÃO:

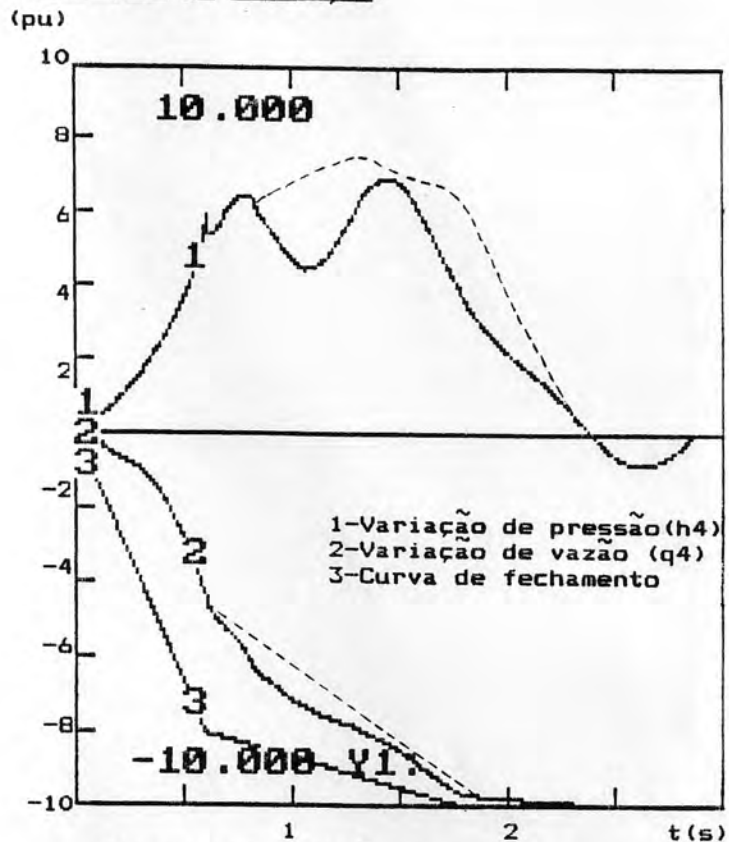


Figura 6-Simulação do exemplo proposto

As curvas pontilhadas (1 e 2) representam os resultados obtidos pelo método das características por Streeter (1978). Observa-se que a diferença de contorno das curvas, ocorre em função do comportamento diferenciado na vazão (curva 2) para o mesmo fechamento em ambos os métodos.

APLICAÇÃO DO MODELO E COMPARAÇÃO COM EXEMPLO ESPECÍFICO:

O exemplo específico simulado será o da Usina de Veu das Noivas (Departamento Municipal de Energia - Pocos de Caldas - MG) Os dados da central estão de acordo com a figura (7):

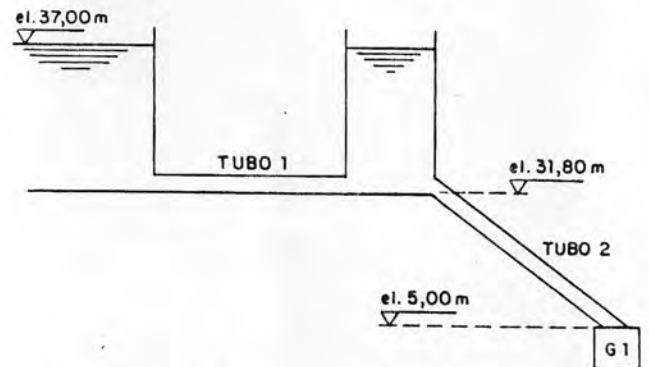


Figura 7- Esquema da UHE Veu das Noivas

- Dados: - Queda bruta : 32 m
- Vazão de projeto: 2.3 m³/s
- Tubo 1 : L=300m;D=1.5113m;e=6.35mm
- Tubo 2 : L=234m;D=1.1049m;e=6.35mm
- Chamine: D=4m;H=6.3m.

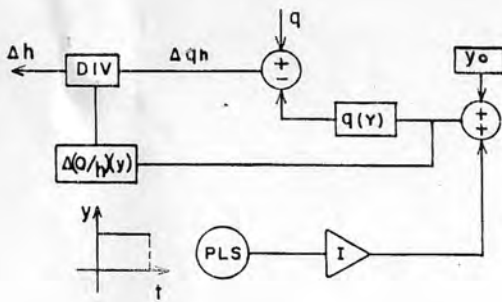


Figura 3 - Modelo de fechamento

onde DIV representa um divisor, Y é a abertura, Yo a abertura inicial, PLS um pulso, q(Y) a vazão em função da abertura da válvula do sistema, Δ(Q/h)(y) uma função característica da válvula ou do sistema distribuidor/rotor em relação a abertura Y.

APLICAÇÃO DO MODELO E COMPARAÇÃO COM EXEMPLO DA LITERATURA - MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS:

No exemplo proposto por Streeter(1978), mostrado na figura(4), os resultados obtidos através do método das características, se comparados com os resultados através de simulação analógica, são muito semelhantes.

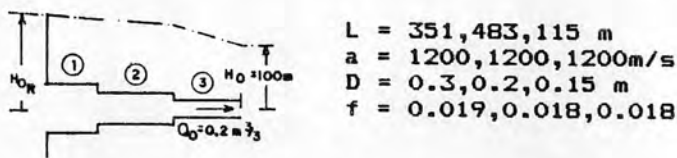


Figura 4a-Sistema proposto por Streeter

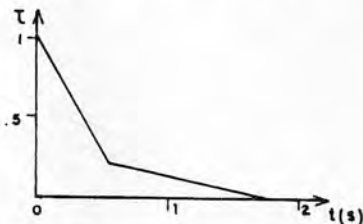


Figura 4b - Curva de fechamento

CIRCUITO ANALÓGICO CORRESPONDENTE:

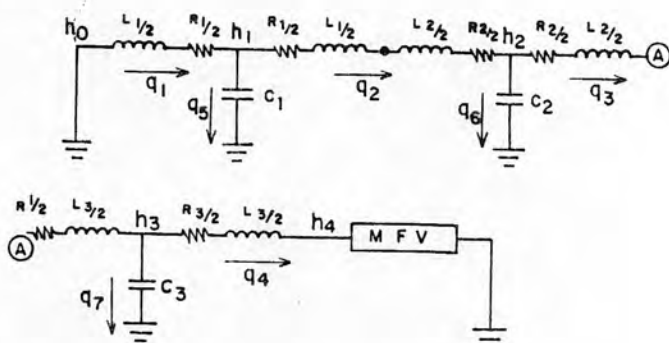


Figura 5 - Circuito analógico

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:

Os resultados obtidos através de simulação analógica se comparados com exemplo da literatura e caso específico, comprovam a consistência do método e principalmente nos fornece uma ferramenta a mais na solução de problemas de transitórios hidráulicos, com vantagem em relação a facilidade de aplicação e a utilização de programas de simulação existentes no mercado para microcomputadores e computadores de grande porte. Porém, faz-se necessário o aprofundamento dos estudos, visando obter modelos mais completos de modo a efetuarmos simulação de turbinas, com altas rotações específicas (Francis rápida, Kaplan e Bulbo) bem como acoplar o modelo hidráulico discretizado a modelos já existentes de reguladores e geradores, de maneira a propiciar o completo estudo de transitórios em sistema elétricos.

REFERÊNCIAS:

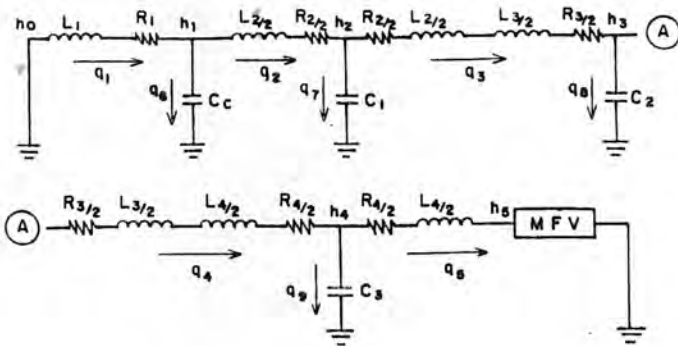
- Bordón, C.A.S. - "Análise de Transitórios Hidráulicos em Pequenas Centrais Hidroelétricas através do Método das Características". EFEI, Itajubá - MG, 1992.
- CHAUDRY, M.H. - "Applied Hydraulic Transients". Van Nostrand, N.Y., 1979.
- CAMINHA, A.C. - "Computação Aplicada a Sistemas Elétricos". Apostila EFEI, 1971.
- STREETER, V.L. e WYLIE, E.B. - "Fluid Transients". McGraw-Hill, N.Y., 1978.
- SOUZA, Z. - "Centrais Hidroelétricas". Apostila EFEI, 1992.

ABSTRACT:

The study of hydraulic transients is important because of frequency and power variations that occur on hydraulic systems. The phenomenon was studied through the use of a non-linear analogic simulation. In order to validate the method, a literature example solved using the method of characteristics is simulated here. Also, the method is applied to a small hydroelectric power plant example.

Para a simulação o tubo 1 foi considerado como um trecho e o tubo 2 de maior pressão foi dividido em três trechos. O fechamento da válvula foi considerado linear com um tempo de 6 (seis) segundos.

CIRCUITO ANALÓGICO:



RESULTADO DA SIMULAÇÃO:

O resultado da simulação é mostrado na figura (8). A curva (1) representa o valor da variação de pressão em h_5 , a curva (2) a vazão de linha q_5 , a curva (3) o fechamento da válvula e a curva (4) a vazão capacitiva q_9 .

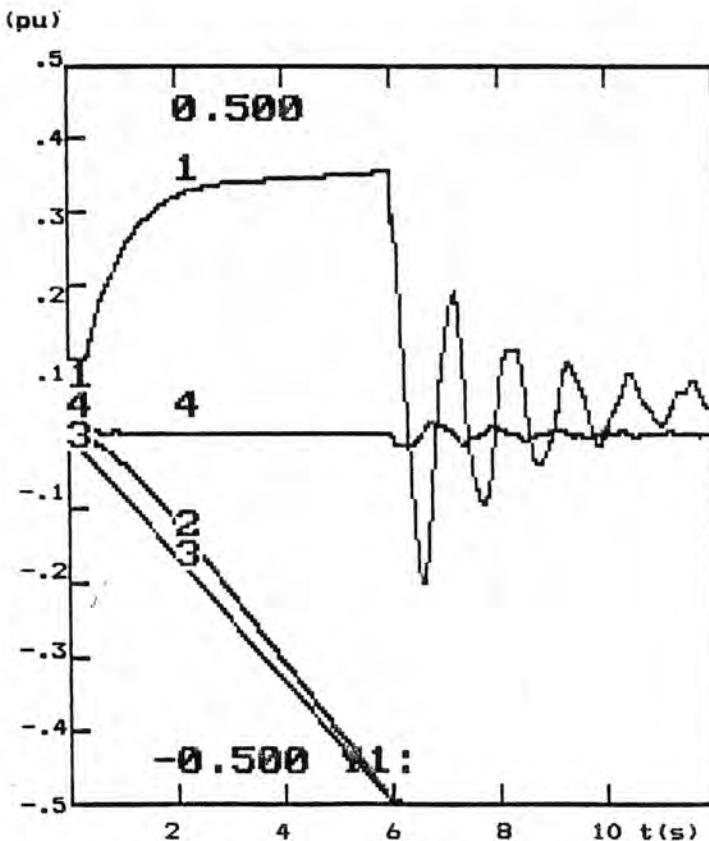


Figura 8- Simulação UHE Veu das Noivas

O resultado da sobrepressão na simulação é de 34%, correspondente ao valor real de rejeição total do grupo G1 da UHE Veu das Noivas, bem como também corresponde ao valor encontrado por simulação através do método das características realizado no trabalho de Bordón (1992).