

PME3403 - Laboratório de Vibrações e Controle

E06 - Controle de Nível de Reservatório

Autor: Prof. Dr. Walter Ponge-Ferreira
E-mail: ponge@usp.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica - PME
Av. Prof. Mello Moraes, 2231
São Paulo SP 05508-970 BRASIL
Tel.: 55 (0)11 3091-9677
Cel: 55 (0)11 97244-0900

8 de março de 2021



Figura 1: Planta física com dois reservatórios de água

1 Preparação, Calibração e Identificação do Sistema

O objetivo da atividade é estudar a dinâmica de dois reservatórios de água interconectados e projetar um controlador de nível de água. Serão realizadas atividades de projeto e construção do aparato experimental, modelagem e simulação, identificação de parâmetros, projeto e implementação de controlador de nível do reservatório.

Deve-se construir um sistema físico, similar ao mostrado na figura 1, composto de dois reservatório de água conectados entre si através de uma tubulação. A vazão de saída do segundo reservatório é feita para atmosfera. O primeiro reservatório é alimentado por cima através de uma vazão controlada $Q(t)$. O nível de água dos reservatórios pode ser medido através de balanças posicionadas sob os reservatórios ou diretamente filmando-se o nível d'água com uma câmera. Se estiverem disponíveis, outros dispositivos de medição de nível e vazão podem ser utilizados.

O esquema da instalação hidráulica é apresentada na figura 2, onde h_1 e h_2 são as alturas dos níveis dos reservatórios 1 e 2, h_0 é a cota das saídas dos reservatórios em relação ao bocal da tubulação de saída para atmosfera, A_1 e A_2 as áreas das seções transversais, p_1 e p_2 as pressões hidrostáticas no fundo dos reservatórios, próximo às tubulações de saída, d_1 , d_2 , L_1 e L_2 os diâmetros e comprimentos equivalentes das tubulações de saída dos reservatórios, $Q(t)$, $q_1(t)$ e $q_2(t)$ as vazões de alimentação e saída dos reservatórios, e p_0 a pressão atmosférica que atua sobre as superfícies dos dois reservatórios e no entorno

do bocal de saída.

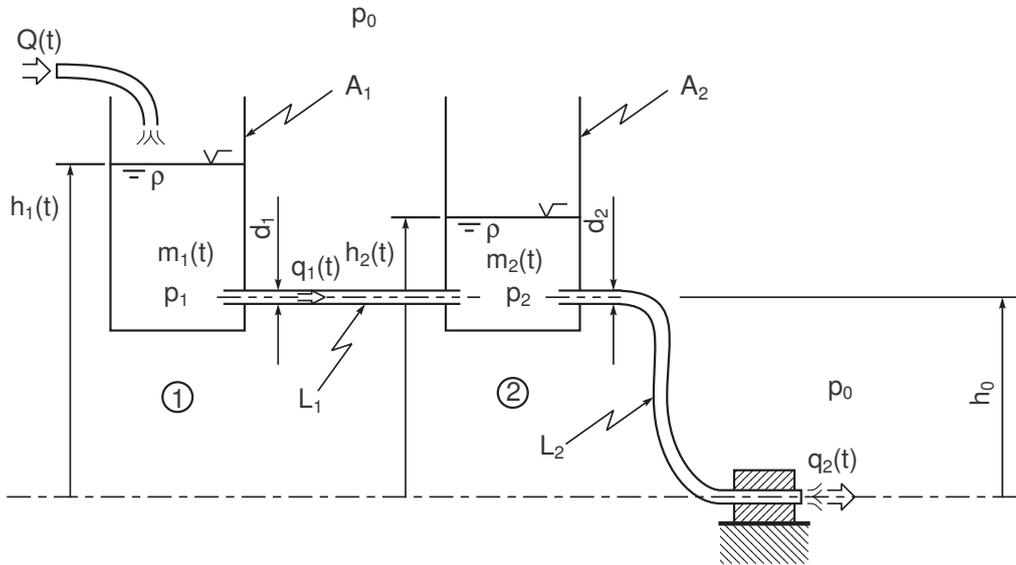


Figura 2: Esquema da instalação hidráulica

A vazão de alimentação externa $Q(t)$ pode ser mantida constante se for adicionado um terceiro reservatório, preferencialmente grande, pendurado em uma mola e tubulação de saída flexível desaguando em uma cota fixa, conforme mostrado na figura 3. Se a rigidez k da mola for ajustada adequadamente, o sistema mantém a vazão constante, definida somente pela cota $h(t) = H_0$ do nível d'água, que deve se manter fixa, em relação ao extremo aberto à atmosfera da tubulação de saída.

Para isso basta que o equilíbrio estático seja mantido tal que:

$$k x(t) = m(t) g$$

com:

$$m(t) = \rho A y(t)$$

Impondo-se que a altura do nível d'água seja constante, i.e.:

$$h(t) = H_0 - x(t) + y(t) = H_0 = \text{cte} \quad \Rightarrow \quad x(t) = y(t)$$

obtemos:

$$k y(t) = \rho A y(t) g$$

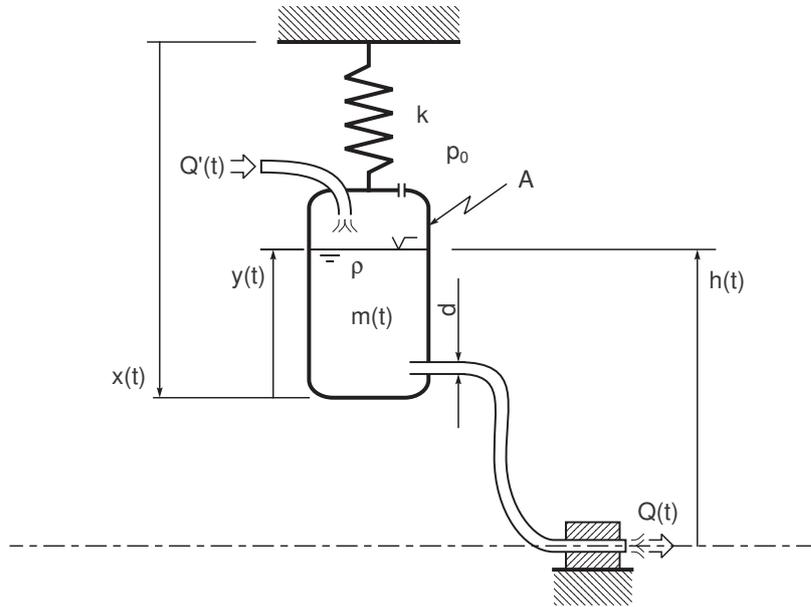


Figura 3: Dispositivo para alimentação com vazão constante

Logo devemos escolher uma rigidez da mola tal que:

$$k = \rho A g$$

assim a cota do espelho d'água mantém-se constante numa altura H_0 em relação ao bocal de saída e portanto:

$$m g h(t) = R Q^2(t) \quad | \quad h(t) = H_0 \quad \Rightarrow \quad Q(t) = \sqrt{\frac{m g H_0}{R}} = Q_0 = \text{cte}$$

onde Q_0 é a vazão de alimentação constante e R a constante de resistência de perda de carga da tubulação de saída, suposta invariante com a posição $x(t)$ do reservatório. Para que não haja influência da forma da tubulação de saída deve-se utilizar um tubulação flexível longa, que não sofra grande variação da curvatura a medida que o reservatório se desloca.

Na figura 4 são mostrados três posições do regulador de vazão que mantém o espelho d'água em uma cota fixa, conforme pode ser observado na sequência das fotos.

Outra possibilidade é utilizar um terceiro reservatório de alimentação com área da seção transversal muito maior que as áreas dos dois reservatórios do sistema ensaiado. Eventualmente, a alimentação de uma torneira com fornecimento de água da caixa d'água residencial possa ser satisfatório.



Figura 4: Dispositivo para regulação da vazão de alimentação externa

Idealmente seria necessário utilizar um regulador de vazão que pudesse ser acionado automaticamente para permitir implementar o controle automático em malha fechada. Nesse caso poder-se-ia utilizar um bomba de vazão variável ou uma válvula reguladora de vazão. Existem opções de baixo custo para realizar esse control nas plataformas *Arduino* ou *Raspberry Pi*. Também seria necessário haver um leitura automática de nível dos reservatórios.

Uma vez construído o dispositivo experimental devemos calibrar a vazão de alimentação e o medidor de nível dos dois reservatórios.

Pede-se:

- a) Descrever o sistema hidráulico, seu funcionamento, sistema de regulação de vazão e sistema de medição de nível.
- b) Calibrar a indicação do medidor de nível nos dois reservatórios, se necessário.
- c) Calibrar o regulador de vazão, para permitir ajustar a vazão em um valor adequado.
- d) Realize algumas manobras no sistema hidráulico para familiarizar-se com o sistema. Registre o comportamento do sistema. Utilize as seguintes manobras:
 - (i) Esvaziamento simultâneo dos dois reservatório após estarem ambos cheios.
 - (ii) Obstruir a saída do segundo reservatório e obstruir inicialmente a passagem entre reservatórios. Deixar um reservatório totalmente cheio e o outro vazio. Anote o nível dos dois reservatórios no início do ensaio. Desobstrua totalmente a passagem entre reservatórios e registrar o sinal de esvaziamento e enchimento dos reservatórios. Registre o nível de equilíbrio.
 - (iii) Repetir o experimento anterior agora estrangulando parcialmente a passagem entre os reservatórios. Compare com o resultado anterior.

2 Ensaio em um Reservatório

Primeiramente será estudada a dinâmica de um único reservatório. Para isso o reservatório 2 deverá permanecer vazio e a perda de carga da sua saída deverá ser mínima, próxima de zero. A alimentação deverá ser feita diretamente pelo topo do reservatório 1.

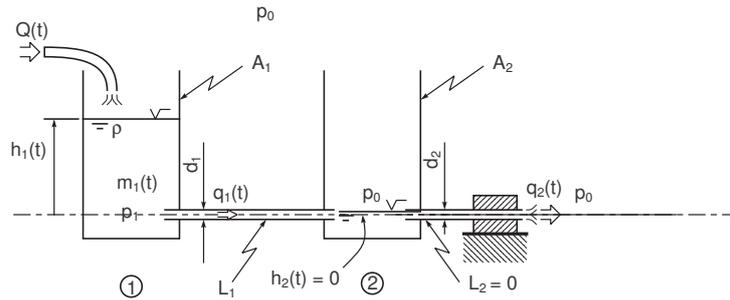


Figura 5: Sistema com um reservatório de água

O modelo mostrado na figura 5 é composto de um reservatório de água (massa específica da água $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) com área transversal A_1 , altura do nível de água $h_1(t)$ em relação à saída e saída com resistência (perda de carga) R_1 . O reservatório é alimentado com um vazão externa $Q(t)$ controlada. O nível encontra-se inicialmente a uma altura H_1 .

O nível do reservatório pode ser obtido da equação da continuidade:

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = Q(t) - q_1 \quad (1)$$

Perda de carga na saída é modelada pela expressão:

$$p_1 = R_1 q_1^2 \quad (2)$$

onde p_1 é a pressão relativa à atmosférica no fundo do reservatório dada por:

$$p_1 = \rho g h_1 \quad (3)$$

onde g é a aceleração da gravidade local ($g_{SP} = 9,78 \text{ m/s}^2$).

O volume útil do reservatório é dado por:

$$V_1 = A_1 h_1 \quad (4)$$

Estudar a dinâmica do reservatório através de um modelo analítico, um modelo de simulação e através de experimentos no sistema físico.

Pede-se:

- a) Escrever a equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico do sistema.
- b) Levantar os parâmetros físicos do sistema real.
- c) Identificar o parâmetro de resistência de perda de carga na tubulação de saída através de dois ensaios:
 - Ensaio em regime permanente com vazão de alimentação constante, $Q(t) = Q_0$, regulada para que a altura de equilíbrio H_1 fique próximo da metade da altura máxima disponível.
 - Ensaio de esvaziamento do reservatório sem alimentação, $Q(t) = 0$, à partir da altura de equilíbrio, $h_1(0) = H_1$.
- d) Determine a solução analítica para resposta livre e para excitação degrau à partir de uma condição inicial dada.
- e) Determine a constante de tempo τ_1 do sistema linearizado de primeira ordem.
- f) Elaborar um modelo dinâmico para simulação numérica:
 - simular a resposta com uma vazão de alimentação constante e determine a altura de equilíbrio em regime permanente.
 - simular a resposta à excitação degrau (aumento de 20% na vazão) à partir da posição de equilíbrio.
 - simular a resposta à excitação por impulso (adicione ΔV mL de água em curto intervalo de tempo) à partir da posição de equilíbrio.
- g) Propor um controlador de nível do reservatório regulando a vazão de alimentação e medido o nível do reservatório.
- h) Ajustar os parâmetros do controlador para uma regulação adequada do nível, controlado o *overshoot* e o tempo de ajuste (*settling time*) para uma excitação degrau.
- i) Simule a resposta do sistema controlado a uma excitação degrau no seu modelo.

- j) Propor um controlador da vazão de alimentação para enchimento rápido do reservatório, sem *overshoot*, e considerando as restrições de alimentação máxima disponível.
- k) Simule o sistema controlado no enchimento rápido.
- l) Se possível, implementar as funções de controle no sistema físico real e verifique o comportamento do controlador de nível para uma excitação degrau e no enchimento rápido do reservatório.

3 Ensaio com dois Reservatórios

Agora será estudado a dinâmica de dois reservatório interconectados. A tubulação de conexão entre reservatórios, cuja resistência foi estabelecida no experimento anterior, deverá permanecer inalterada. Agora deve-se adicionar uma perda de carga à saída do segundo reservatório (*reservatório 2*) de maneira que esse reservatório retenha um volume de água. A alimentação permanece no topo do reservatório anterior, *reservatório 1*.

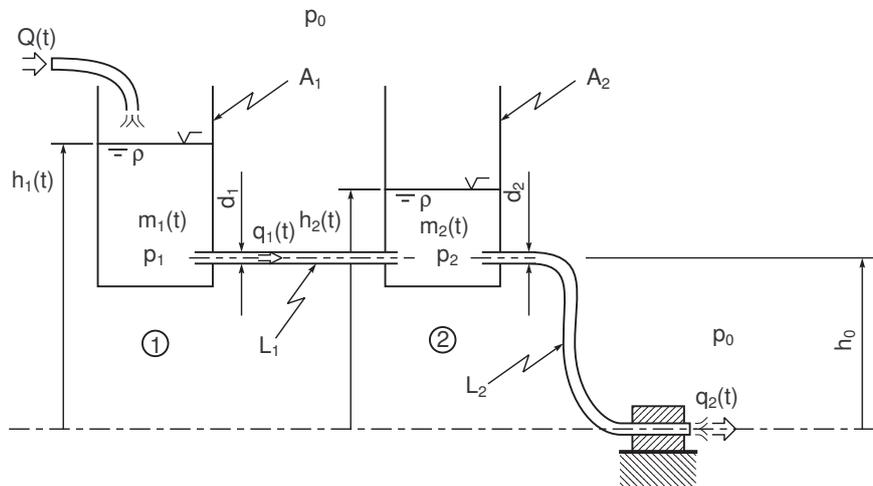


Figura 6: Sistema com dois reservatórios de água

Para o sistema de dois reservatórios mostrado na figura 6 pede-se:

- a) Escrever as equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistema.

- b) Levantar os parâmetros físicos do sistema real.
- c) Identificar os parâmetros de resistência de perda de carga, R_1 e R_2 , das duas tubulações através de dois ensaios.
- Ensaio em regime permanente com vazão de alimentação constante, $Q(t) = Q_0$. A tubulação de interconexão dos reservatórios deve permanecer a mesma do experimento anterior e perda de carga da saída do *reservatório 2* regulada para que a altura de equilíbrio no *reservatório 2* fique próxima da metade da altura do *reservatório 1*. (*Atenção: Não altere mais as tubulações após esse ensaio!*)
 - Ensaio de esvaziamento dos reservatórios sem alimentação, $Q(t) = 0$, à partir das alturas de equilíbrio, $h_1(0) = H_1$ e $h_2(0) = H_2$, reguladas no ensaio anterior.
- d) Determine a solução analítica do sistema para resposta livre e para excitação degrau à partir de uma condição inicial dada.
- e) Determine as constantes de tempo τ_1 e τ_2 do sistema linearizado de segunda ordem.
- f) Elaborar um modelo dinâmico para simulação numérica:
- simular a resposta com uma vazão de alimentação constante e determine a altura de equilíbrio em regime permanente.
 - simular a resposta à excitação degrau (aumento de 20% na vazão) à partir da posição de equilíbrio.
 - simular a resposta à excitação por impulso (adicione ΔV mL de água em curto intervalo de tempo) à partir da posição de equilíbrio.
- g) Propor um controlador de nível do *reservatório 2* regulando a vazão de alimentação do *reservatório 1*.
- h) Ajustar os parâmetros do controlador para uma regulação adequada do nível, controlado o *overshoot* e o tempo de ajuste (*settling time*) para uma excitação degrau.
- i) Simule a resposta do sistema controlado a uma excitação degrau no seu modelo.
- j) Propor um controlador da vazão de alimentação para enchimento rápido do *reservatório 2*, sem *overshoot* do *reservatório 1*, e considerando as restrições de alimentação máxima disponível.

- k) Simule o sistema controlado no enchimento rápido.
- l) Se possível, implementar as funções de controle no sistema físico real e verifique o comportamento do controlador de nível para uma excitação degrau e no enchimento rápido do *reservatório 2*.

4 Relatório

Escreva um relatório técnico de projeto do controlador de nível de reservatório, apresentando o dispositivo experimental, os modelos dos sistemas, os resultados das simulações, o projeto dos controladores e os resultados experimentais.

5 Bibliografia

Franklin, Powell & Emani-Naeini **Feedback Control of Dynamic Systems**. 7 ed., Pearson Higher Education Inc., NJ, USA. p.62-65, p.82,, p.118-123, p.131-137, p.180-212, p.436-437, p.439-440.