

Desenvolvimento de Controladores para uma Plataforma Móvel Destinada ao Estudo da Interação Fluido - Estrutura

Dino Cassol¹; André L. R. Rosa¹; Eduardo Hartmann¹; Ismael M. Pereira¹; Tomaz G. Moreira¹; Daniel S. Guimarães Jr.¹; Vitor I. Gervini¹; Vagner S. Rosa¹; Sebastião C. P. Gomes¹; Jairo F. L. Coelho²; Waldir T. Pinto²

¹*Universidade Federal do Rio Grande (FURG) Núcleo de Matemática Aplicada e Controle (NuMA), Av. Itália, km 8, 96201-900, Rio Grande, RS*

²*Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Laboratório de Interação Fluido – Estrutura (LIFE), Av. Itália, km 8, 96201-900, Rio Grande, RS*

RESUMO: Um suporte experimental para o estudo da interação fluido-estrutura foi construído na Universidade Federal do Rio Grande (FURG) pelos laboratórios LIFE (Laboratório de Interação Fluido – Estrutura) e NuMA (Núcleo de Matemática Aplicada e Controle), ambos pertencentes à FURG. Trata-se de um canal com 16m de comprimento, sobre o qual desloca-se uma plataforma controlada em quatro movimentos: um longitudinal ao longo do canal (deslocamento de toda a plataforma) e outros três com menores amplitudes, sendo dois transversais e um longitudinal, movimentos estes relativos à plataforma principal. O maior problema imposto ao controle de sistemas mecânicos em geral está relacionado a atritos não lineares que geram zona morta em torque e movimentos intermitentes do tipo adere – desliza (*stick-slip*). Os esforços necessários ao controle situam-se, em alguns casos, no interior da zona morta em torque, delimitada pelos níveis positivo e negativo do atrito estático, diminuindo assim o desempenho das leis de controle. O presente artigo relata o esforço para controlar estes quatro graus de liberdade com o melhor desempenho possível.

PALAVRAS-CHAVE: atuadores robóticos, modelagem dinâmica, controle.

ABSTRACT: An experimental support for the study of the interaction fluid-structure was built at the Federal University of Rio Grande (FURG) by the laboratories LIFE (Interaction Laboratory of Fluid - Structure) and NuMA (Center for Applied Mathematics and Control), both belonging to FURG. This is a channel to 16m in length, on which goes to a platform controlled in four movements: a longitudinal along the channel (displacement of the entire platform) and three others with minor ranges and two cross and one longitudinal. These movements are related to the main platform. The biggest problem imposed on the control of mechanical systems in general is related to frictions that generate non-linear torque dead zone and stick-slip behavior. The control efforts are placed, in some cases, inside the torque dead zone, bounded by positive and negative levels of static friction, thereby reducing the performance of the control laws. This paper reports the effort to control these four degrees of freedom with the best possible performance.

KEYWORDS: robotic actuators, dynamic modeling, control.

1. INTRODUÇÃO

O controle de sistemas mecânicos apresenta dificuldades extras quando os atuadores utilizados são do tipo moto-redutores convencionais. Atritos não lineares inerentes à dinâmicas destes atuadores podem provocar erros de estado estacionário, zona morta em torque e movimentos intermitentes do tipo adere-desliza (*stick-slip*) ([1], [2], [3], [6]). Os atuadores não são os únicos responsáveis pelos atritos não lineares, embora, em muitos casos, sejam os principais responsáveis. Os mancais de sustentação de eixos, bem como guias de deslizamento originam também atritos não lineares. Este é precisamente o caso da plataforma móvel montada sobre o canal do LIFE, na qual existem mancais de rolamento e guias de deslizamento compondo todo o sistema mecânico da plataforma. O objetivo principal do presente artigo é mostrar o esforço realizado para controlar os quatro movimentos da plataforma mantendo um bom desempenho, apesar dos atritos não lineares.

A figura 1 mostra uma foto da plataforma móvel montada sobre o canal, enquanto que na figura 2 pode-se perceber, em maiores detalhes, os tipos de transmissão de movimento e as guias de deslizamento. Um dos atuadores movimenta toda a plataforma, enquanto que os outros três atuadores geram movimentos oscilatórios, a fim de movimentar de forma harmônica as estruturas que estarão imersas no canal. Conforme dito anteriormente, este canal está montado no LIFE (Laboratório de Interação Fluido – Estrutura, FURG), sendo que os projetos elétrico, eletrônico e de controle ficaram sob a responsabilidade do NuMA (Núcleo de Matemática Aplicada e Controle, FURG).

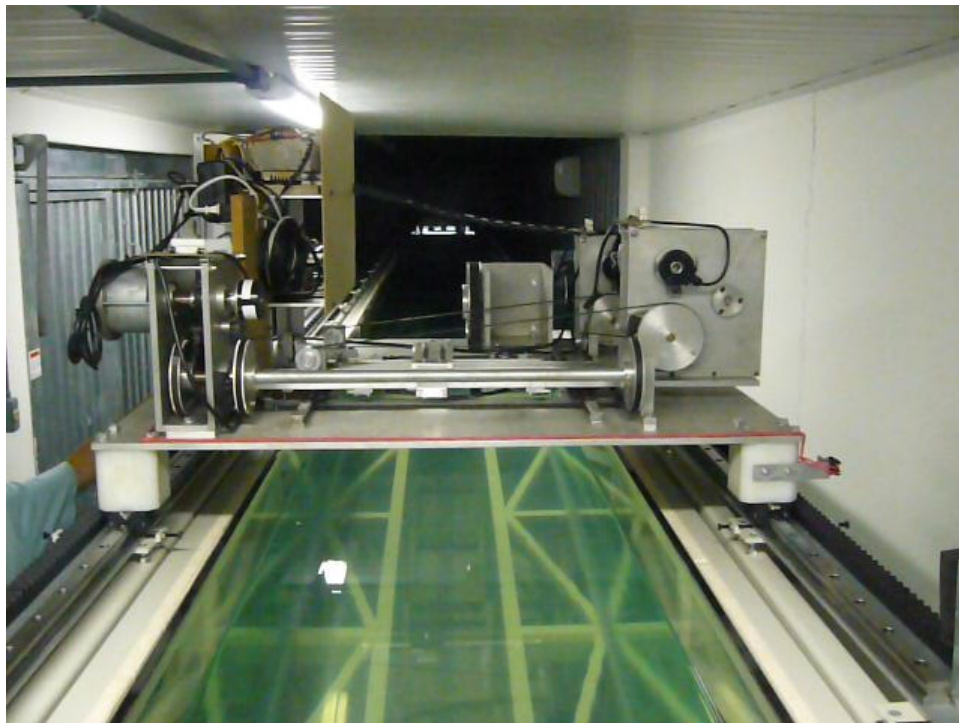


Figura 1. Foto mostrando o canal com a plataforma móvel.



Figura 2. Foto mostrando detalhes do acionamento da plataforma móvel.

2. MODELO DINÂMICO DE ATUADORES

Um atuador robótico do tipo moto-reductor, pode ser considerado como um elemento transmissor de movimento com uma certa elasticidade interna, conforme a figura abaixo.

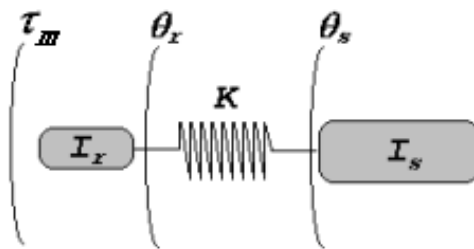


Fig. 3. Atuador com um modo flexível.

I_r é a inércia do rotor, K a constante elástica interna e I_s a inércia da carga acoplada à saída do reductor. τ_m , θ_r e θ_s são o torque motor e as posições angulares do rotor e carga respectivamente. Uma equação diferencial representando a dinâmica deste atuador pode ser facilmente obtida, ficando a mesma sob a forma [8]:

$$\begin{aligned}
I_r \ddot{\theta}_r + \frac{K}{\eta^2} (\theta_r - \eta \theta_s) &= \tau_m - \tau_{at} \\
I_s \ddot{\theta}_s - K \left(\frac{\theta_r}{\eta} - \theta_s \right) &= 0
\end{aligned} \tag{1}$$

τ_{at} corresponde ao torque de atrito não linear, considerado aqui como atuando integralmente no rotor do atuador e η é o fator de redução. Quando considera-se uma aproximação rígida para o atuador, o modelo do mesmo passa a ter apenas um grau de liberdade e $\theta_r/n = \theta_s = \theta$. O sistema de equações (1) reduz-se então a:

$$(\eta^2 I_r + I_s) \ddot{\theta} = \eta (\tau_m - \tau_{at}) \Rightarrow I \ddot{\theta} = T_m - T_{at} \tag{2}$$

onde I , T_m e T_{at} são a inércia, torque motor e torque de atrito, com unidades físicas no lado saída do redutor. Existem diversos modelos de atrito propostos na literatura, sendo que um dos mais utilizados modelo LuGre [4], o qual corresponde a uma modificação do modelo de Dahl [1]. Estes dois modelos apresentam uma séria dificuldade para se identificar experimentalmente alguns de seus parâmetros. Optou-se então por se utilizar o modelo proposto por Gomes ([7], [8]), o qual representa bem os fenômenos não lineares associados ao atrito, sem apresentar dificuldades de identificação paramétrica. Segundo o modelo de Gomes, o atrito é escrito sob a forma:

$$T_{at} = f_v^* \dot{\theta}_r \tag{3}$$

f_v^* é o coeficiente de atrito viscoso variável [8], o qual é função das variáveis de estado e também do torque motor. Este modelo representa bem o fenômeno conhecido em literatura inglesa pelos nomes *stick* e *slip*, muito presente em mecanismos de transmissão de movimento.

3. DINÂMICA DA PLATAFORMA

Conforme explicitado anteriormente, a plataforma móvel construída possui ao todo quatro graus de liberdade, conforme indicado no desenho da figura 4. As duplas setas na nesta figura indicam os quatro tipos de movimento simultâneos que podem ser realizados pela plataforma móvel. Para efeito do projeto de controle, considerou-se que os quatro graus de liberdade são independentes entre si, fato que permite projetar individualmente os ganhos do controlador para cada atuador. Utilizou-se a aproximação rígida para a dinâmica do atuador, de forma que cada um dos quatro modelos dinâmicos pode ser posto na forma:

$$I_j \ddot{\theta}_j + f_{vj}^* \dot{\theta}_j = T_{mj} \tag{4}$$

com $j=1,\dots,4$. Há acoplamento dinâmico entre os dois movimentos na direção longitudinal do canal. Porém, há uma significativa diferença entre as inércias deslocadas, de forma que o desacoplamento adotado constitui uma boa aproximação da realidade física.

Segundo o modelo de atrito adotado [8], o coeficiente de atrito viscoso é variável, dependendo da posição, da velocidade e também do torque motor. Definindo-se o vetor de estado na forma $\bar{x}_j = [\theta_j \quad \dot{\theta}_j]^T$, a dinâmica de cada movimento independente pode ser escrita na forma:

$$\dot{\bar{x}}_j = A(\bar{x}_j, T_{mj})\bar{x}_j + BT_{mj} \quad (5)$$

$$\text{onde } A(\bar{x}_j, T_{mj}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{f_{vj}^*(\bar{x}_j, T_{mj})}{I_j} \end{bmatrix} \text{ e } B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_j \end{bmatrix}.$$

Os parâmetros de cada uma das quatro dinâmicas foram identificados a partir de experimentos em malha aberta e assim, os modelos dinâmicos serviram de base para os projetos dos controladores.

4. PROJETO DE CONTROLE

No presente artigo optou-se por apresentar o controle em malha fechada para os três atuadores de corrente contínua. O atuador relativo ao movimento de toda a plataforma é de corrente alternada, tendo-se utilizado um controle do tipo PI (proporcional e integral) [5], com correção de posição a partir de lógica FUZZY, de forma que, por razões de espaço, este controle será explicado em um outro artigo a ele especialmente dedicado.

Para os atuadores de corrente alternada a opção foi utilizar um controle do tipo PID (proporcional, integral e derivativo) [5]. A ação de controle pode ser posta na seguinte forma:

$$T_{mj} = K_{pj} \left[e_j(t) + T_{dj} \dot{e}_j(t) + \frac{1}{T_{ij}} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (6)$$

onde $e_j(t) = \theta_{rj} - \theta_j$ corresponde ao erro em posição angular, ou seja, a diferença entre a posição angular de referência e a posição angular de saída (lida do encoder). Os ganhos K_{pj}, T_{dj} foram projetados utilizando-se uma aproximação linear (atrito viscoso constante) e estabelecendo-se um tempo de resposta (tempo de subida) e uma razão de amortecimento convenientes considerando que o controle deve seguir trajetórias em posição com frequência de até 5Hz. Posteriormente, o modelo não linear foi considerado e ajustou-se, por tentativa e erro, a componente integral a partir de variações no ganho T_{ij} , de forma a se tentar recuperar um desempenho semelhante ao caso linear. Posteriormente foram realizados resultados experimentais em malha fechada, tendo-se constatado uma pequena perda de desempenho com relação aos resultados simulados. Um ajuste apenas na

componente integral ainda foi necessário a fim de se recuperar o mesmo desempenho previsto em simulação.

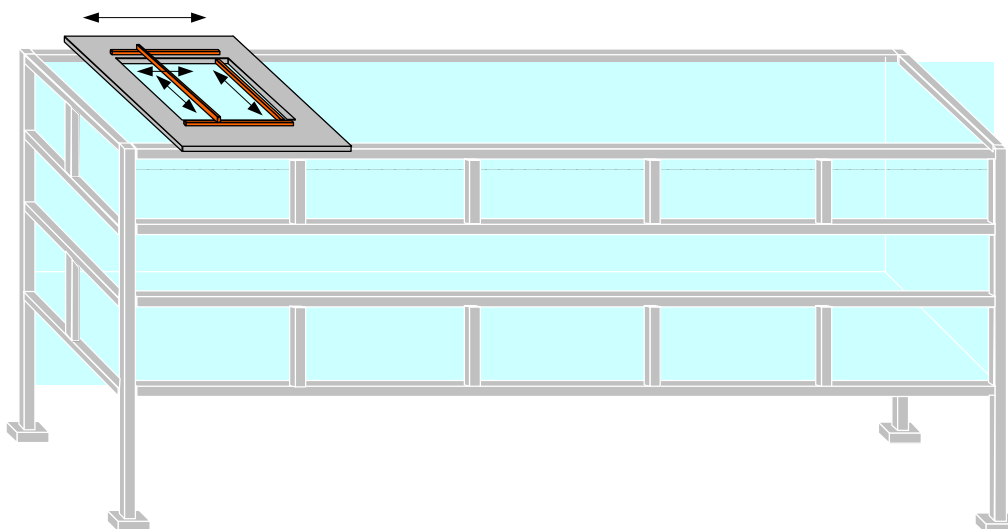


Figura 4. Desenho ilustrativo do canal com a plataforma móvel.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As figuras 5 e 6 mostram resultados de dois experimentos realizados com a plataforma móvel controlada simultaneamente em seus quatro movimentos. Todos os gráficos correspondem à posição linear de deslocamento em (m), estando a posição de referência em vermelho. O gráfico superior esquerdo mostra o movimento longitudinal de toda a plataforma, cujo acionamento é com o atuador de corrente alternada. O gráfico superior direito mostra o movimento oscilatório também na direção longitudinal do canal (atuador de corrente contínua), enquanto que os dois gráficos inferiores mostram os movimentos de oscilação transversais à direção longitudinal do canal (atuadores de corrente contínua). A fim de melhorar a visualização das oscilações de mais alta frequência visualiza-se apenas uma janela com apenas 3s e 2s nos gráficos inferiores das figuras 5 e 6. No experimento da figura 5 impôs-se senoides de 0.5Hz e 0.3Hz para como posições de referência, enquanto que na figura 6 impôs-se senoides de 0.5Hz e 4 Hz. É perceptível um bom desempenho do controle, ou seja, as posições de referência foram seguidas com erro mínimo. Portanto, demonstra-se assim que é possível projetar os ganhos de forma a atender requisitos de desempenho no seguimento de trajetórias tanto em baixa quanto em mais alta frequência.

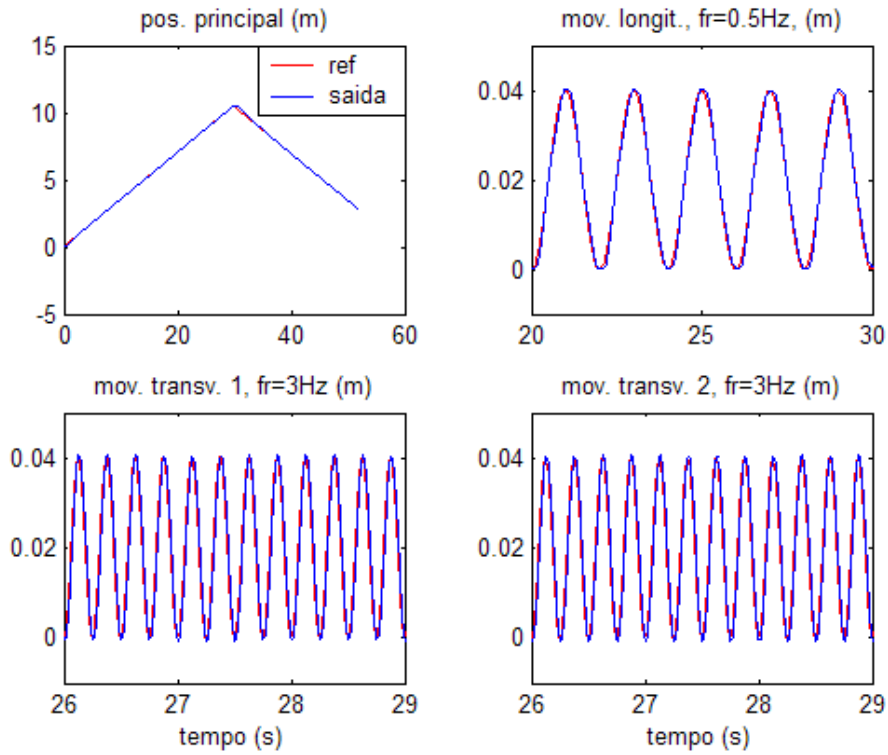


Figura 5. Resultados experimentais com movimentos transversais a 3 Hz.

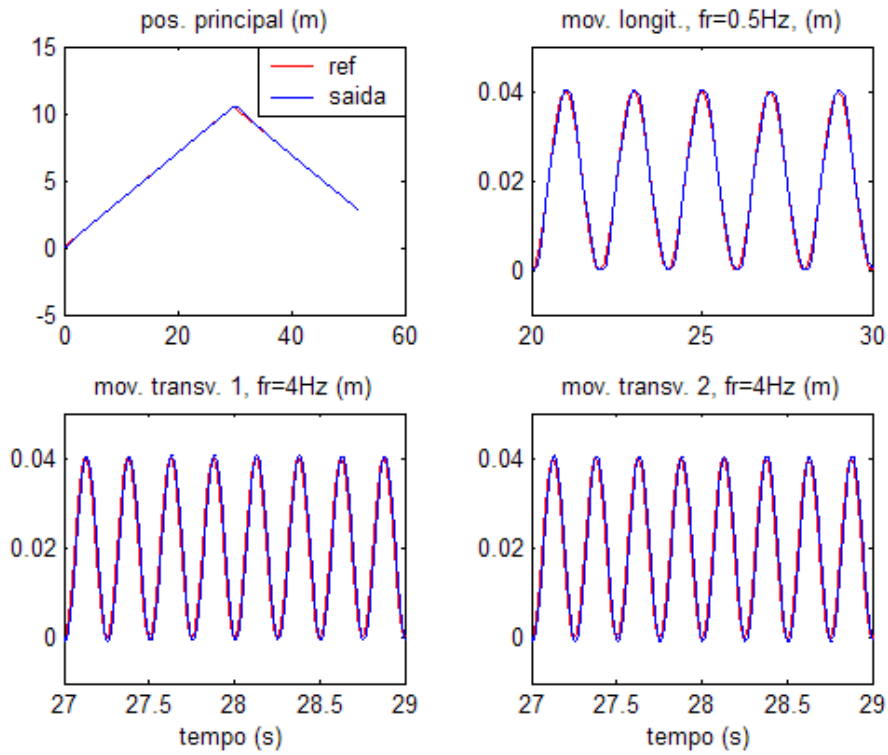


Figura 6. Resultados experimentais com movimentos transversais a 4 Hz.

6. CONCLUSÕES

O presente artigo mostrou o esforço realizado no sentido de controlar os quatro graus de liberdade da plataforma móvel instalada no canal construído no LIFE-FURG, para a realização de pesquisas sobre a interação entre fluido e estrutura. Os projetos de controle foram realizados tendo-se como base os modelos dinâmicos previamente desenvolvidos para cada um dos quatro graus de liberdade, considerados, para efeito de projeto, como independentes entre si. Os atritos não lineares existentes nos sistemas mecânicos de transmissão de movimento são os maiores causadores de problemas que tendem a inibir o bom desempenho das leis de controle. Porém, a estratégia de controle proposta promoveu respostas estáveis e com um bom desempenho em malha fechada, tanto para entradas de referência de até 5Hz, quanto para referências com menores frequências, em torno de 0.5 Hz. Os erros em posição no seguimento das trajetórias de referência se mantiveram dentro de limites aceitáveis e já previstos em simulação.

Pode-se afirmar, portanto, que os objetivos do projeto foram plenamente alcançados. A plataforma móvel montada sobre o canal no LIFE está operacional, constituindo-se em um importante suporte experimental para a validação de pesquisas desenvolvidas em teoria, relativas à dinâmica da interação entre fluido e estruturas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Armstrong-Helouvry, B. “Stick slip and control in low-speed motion”. IEEE Transaction on Automatic Control, 38 (10), 1993.
- [2] Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P. E. and Canudas de Wit, C. “A survey of analysis tools and compensation methods for control of machines with friction”. Automatica, 30 (7), 1994.
- [3] Besançon-Veda, A. and Besançon, G. “Analysis of a two-relay system configuration with application to Coulomb friction identification”. Automática, 35 (8), 1999.
- [4] Canudas de Wit, C., Astrom, K. J. and Lischinsky, P. “A new model for control of systems with friction”. IEEE Transaction on Automatic Control, 40 (3), 1995.
- [5] Franklin, G.F.; Powell J.D.; Emami-Naeini, Abbas. Feedback Control of Dynamic Systems. Third Edition. Addison-Wesley Publishing Company. 1994.
- [6] Gomes, S. C. P. and Chrétien, J. P. “Dynamic modeling and friction compensated control of a robot manipulator joint”. In IEEE Robotic and Automatic Conference, Nice, France, May, 1992.
- [7] Gomes, S. C. P. and Rosa, V. S. “A new approach to compensate friction in robotic actuators”. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2003), Taipei, Taiwan, 2003.
- [8] Gomes, S. C. P., Rosa, V. S. and Albertini, B. C. “Active control to flexible manipulators”. IEEE/ASME, Transactions on Mechatronics, 11 (1), USA, 2006.