

Plataforma de Levitação de Sólidos Aplicada à Engenharia de Controle.

Alan James Borges Alves Cruz¹, Jose Henrique Galeti¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas – MS

alan.cruz@estudante.ifms.edu.br, jose.galeti@ifms.edu.br

Resumo

As aplicações de controle automático nas áreas industriais, agroindustriais e recentemente, na agricultura de precisão, tem sido destaque nos assuntos relacionados às novas tecnologias. Este projeto propõe uma plataforma de levitação de sólidos destinada ao ensaio de diferentes técnicas de controle tanto para a área de engenharia como para verificação de princípios aplicados aos transportes pneumáticos. Fundamentalmente, a diversidade de experimentos que poderá ser realizados em um único dispositivo é grande, pois permitirá ao usuário definir diferentes modos de controle, além de definir variáveis de interesse como, posição, velocidade, e aceleração do objeto flutuante dentro de seus diagramas de blocos, feito em um controlador geral, embarcado em uma plataforma de hardware, multifuncional (MyRIO). Por fim, a plataforma será um modelo em menor escala capaz de reproduzir a dinâmica dos transportes pneumáticos de sólidos, com os transportes de grãos empregados na agricultura de precisão.

Palavras-chave: Controle Automático, MyRIO, Levitação de sólidos.

Introdução

Neste projeto será descrito a levitação aerodinâmica (pneumática) de uma esfera, que tem como objetivo manter a esfera uma posição ideal de altura controlando (automaticamente) a vazão de ar em um condutor. As equações dinâmicas, obtidas a partir da equação de Bernoulli, considerando a descrição não-linear da corrente de ar. Essa equação faz uma predição importante da relação entre a pressão e a velocidade de um fluido ideal em movimento.

Contudo, nem sempre a sociedade se apropria dos benefícios trazidos pelos avanços na área de controle. Em particular, no contexto agroindustrial local (Brasil/MS), existe um atraso considerável (distanciamento) entre as propostas de controle pesquisadas nas academias e sua efetiva aplicação na agricultura de precisão. A plataforma experimental é baseada em um sistema de levitação pneumática (CHACÓN et al., 2017) e consiste em um condutor do fluido com um objeto em seu interior que deve mover-se (velocidade e aceleração) ou levantar de maneira desejada, sem outro contato mecânico, a não ser com o fluido em movimento.

Para tanto, um insuflador forçará o fluxo ascendente de ar pelo condutor, controlando assim o movimento do objeto, enquanto um sensor informa ao controlador sua posição. De acordo com a resposta recebida, o controlador faz com que o insuflador diminua ou aumente o fluxo do fluido pelo tubo, conseqüentemente elevando ou diminuindo a posição do objeto.

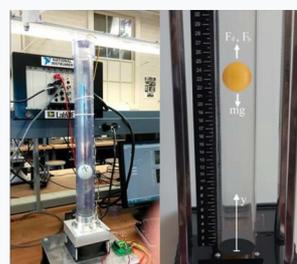


Figura 1: Fotografia ilustrativa do aparato

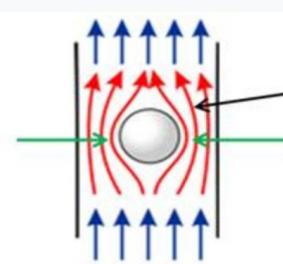


Figura 2: Corrente de ar

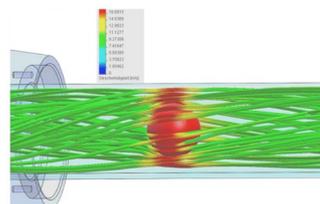


Figura 3: imagem representando as diferenças de velocidade do fluxo de ar no interior do duto.



Figura 4: Fotografia do MyRio-1900 nas versões usuário final e OEM.

Metodologia

Durante o projeto, uma solução adequada para um problema real nem sempre obtém exatamente todas as informações necessárias ao modelamento. Portanto, uma representação do processo real requer, em algum grau, estimativas, pressupostos e considerações baseados em modelos matemáticos com dinâmica similar. A escolha do modelo matemático é provavelmente a fase mais crucial do projeto e análise das diferentes estratégias de controle, assim como, a escolha de um modelo de emulação (em geral modelo reduzido e didático) é crucial para o levantamento adequado de parâmetros do sistema real. As equações dinâmicas,

obtidas a partir da equação de Bernoulli, considerando a descrição não-linear da corrente de ar. Essa equação faz uma predição importante da relação entre a pressão e a velocidade de um fluido ideal em movimento.

$$\rho_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

Sendo que, $\frac{1}{2} \rho v^2$ é a energia cinética, $\rho g y_1$ é a energia potencial gravitacional, p_1 e p_2 são as pressões estáticas do ar na seção cruzada, ρ é a densidade do seguinte ar, y_1 e y_2 são as diferentes distâncias entre a bola e o fundo do tubo, v_1 e v_2 são as velocidades médias do fluxo do fluido na seção.

Observa-se em (2) e (3), pela segunda lei de Newton, a equação dinâmica para a levitação da esfera no sistema do tubo, o qual tem sido estudado por diversos trabalhos. As forças agindo sobre o objeto em levitação são: a impulsão (F_b), força de arrasto (F_d) e a força do peso da bola (F_g). A força de arrasto produz o movimento "levitador" e é função da diferença da pressão do ar e da força de fricção do ar. Os efeitos, para cima da corrente de ar, e para baixo da gravidade vão induzir um movimento para cima ou para baixo na esfera.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_b + F_d - F_g$$

(2)

$$F_b = \rho g V_b$$

$$F_d = f(\Delta p, F_f)$$

(3)

Onde Δp é a diferença da pressão do ar, ρ é a densidade do ar, g é a aceleração gravitacional, m é a massa da esfera, V_b é o seu volume e F_f é força de fricção causada pela corrente de ar. O coeficiente de arrasto é um termo que depende do coeficiente de Reynolds, ao qual, por sua vez, depende da velocidade relativa da esfera que se move dentro do fluxo, e da velocidade do fluxo.

$$F_d(\rho, C_d, A, v_f, y) = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{y}$$

(4)

Onde, v_f é a velocidade do ar dentro do tubo, A é a área da bola, C_d é o coeficiente de arrasto, e y é a posição da esfera no duto. Concatenando (1), (2), (3) e (4), as equações

dinâmicas do sistema podem ser obtidas a partir da resultante das forças, da corrente de ar e a gravitacional:

$$m \Delta \ddot{y} = -mg + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{y}$$

(5)

Ainda para o objetivo deste projeto, assume-se que C_d é constante devido a pequena velocidade do fluxo. A esfera em levitação estará em um estado de repouso ($\dot{y} = \ddot{y} = 0$). O sensor de posição mede a distância entre o topo do tubo e a esfera, i.e. fornece a posição da esfera. Definindo-se V_{eq} como a velocidade da esfera em relação ao ar no ponto de equilíbrio ($v_{eq} = v_f - \dot{y}$), obtém-se g através:

$$g = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A \cdot V_{eq}^2}{2(m - \rho \cdot V_b)}$$

(6)

Finalmente, a equação dinâmica do processo é obtida:

$$\ddot{y} = g \cdot \left(\frac{m - \rho V_b}{m} \right) \dot{y}$$

(7)

O sistema pode ser modelado tanto como linear como não-linear. A escolha entre estes dois modelos depende do objetivo do projeto de controle a ser adotado. No caso mais comum, é possível obter-se a linearização, ao redor do ponto de equilíbrio, usando a expansão de Taylor:

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0)$$

(8)

Assumindo que $x = \frac{v_f - \dot{y}}{v_{eq}}$, e a expansão da relação (7) sobre o ponto $x = 1$, tem-se:

$$\ddot{y} = \frac{2 \cdot g}{v_{eq}} \left(\frac{m - \rho V_b}{m} \right) (v_f - \dot{y} - v_{eq})$$

(9)

O que determina a resposta do sistema no ponto de operação, a partir da qual é possível obter-se a função de transferência do sistema.

Descrevendo o sistema com uma entrada e uma saída (SISO), o sinal de entrada é a velocidade do fluido gerado pela turbina e a saída é o incremento da posição da esfera. Assumindo que o sistema está bem descrito pelo modelo linearizado, a função de transferência entre a posição da bola e a rapidez do vento é dada por:

$$\frac{y(s)}{v(s)} = \frac{1}{s} \frac{b}{s+b} \quad (10)$$

Onde $v(s)$ e $y(s)$ são a velocidade do fluido e o incremento da posição da esfera no ponto de equilíbrio, respectivamente, onde $b = 2g(m - \rho V_b) / m v_{eq}$.

Considerando que a turbina pode ser modelada como um processo de primeira ordem, a função de transferência entre a tensão elétrica aplicada à turbina e a velocidade do fluido produzido, pode ser representada:

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{k_v}{\tau s + 1} \quad (11)$$

Onde $u(s)$ é a tensão aplicada à turbina. Além disso, k_v é o ganho de sensibilidade que relaciona a tensão de entrada com a velocidade do fluido no estado estacionário e τ é a constante de tempo da turbina. Deve-se notar que existe um atraso na medição da posição da esfera que precisa ser incluído no modelo. O propulsor de ar usado nesta configuração possui componentes eletrônicos que podem apresentar atrasos no tempo de execução dos comandos. Além disso, podem ser necessários filtros passa-baixo para atenuação de ruídos ou, no caso de aquisição digital, filtro anti-aliasing, o que também insere atrasos no sistema. Assumindo T_d como sendo os efeitos dos atrasos cumulativamente, obtém-se:

$$e^{-T_d s} = \frac{1 - T_d s}{T_d s + 1} \quad (12)$$

Finalmente, é possível escrever a função de transferência do sistema como:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b \cdot k_v \cdot (1 - T_d s)}{s(s+b)(\tau s + 1)(T_d s + 1)} \quad (13)$$

medido por um sensor ultrassônico eliminando o erro em regime permanente.

Considerações Finais

Após a construção do protótipo, baseada em um Sistema de Levitação Aérea, o controlador foi implementado e testado em circunstâncias semelhantes. Os experimentos foram repetidos várias vezes para cada caso testado, gerando vários conjuntos de dados, a fim de obter resultados mais robustos. Os resultados verificam que, além do controlador PID em sua forma clássica, várias modificações não lineares podem ser consideradas para lidar com diferentes necessidades de controle, como a otimização do número de ações de controle, ou além das restrições que a linearidade impõe ao desempenho que pode ser alcançado por um PID.

Agradecimentos

Agradeço ao IFMS/TL pelo incentivo financeiro de acordo com o Edital nº 063/2022 – IFMS/PROEN.

Referências

ADUOV, M. A. et al. Development Of Pneumatic Seeder For Sowing Grain Crops. Mechanization In Agriculture & Conserving Of The Resources, v. 65, n. 1, p. 25-26, 2019.

Resultados e Discussão

O MyRIO terá como sua entrada a posição da bolinha e sua saída irá determinar a velocidade do motor, apresentando essa descrição a planta tem um erro de regime permanente, pois dentro dele fisicamente irá comparar com um setpoint desejado, gerando a entrada do controlador. Então como técnica de controle, aplicou-se um PID. Com a aplicação do integrador ao sistema, vai obtendo um histórico dos erros