

Fabricação e Controle de Um Levitador Pneumático Duplo Reverso Acoplado^{*}

Rafael Pissinati de Souza^{*} Sérgio Paulo Neves dos Santos^{**}
Luiz Medeiros Barros^{***} Fernando Gromiko Helena^{****}
José Diogo Forte de Oliveira Luna[†]

^{*} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia –
Campus Porto Velho Calama, (rafaelpissinati@gmail.com).

^{**} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia –
Campus Porto Velho Calama, (sergio2020pvh@gmail.com)

^{***} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia –
Campus Porto Velho Calama, (luizbarrosppv@hotmail.com)

^{****} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia
– Campus Porto Velho Calama, (fernando.helena@ifro.edu.br)

[†] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia –
Campus Porto Velho Calama, (jose.luna@ifro.edu.br)

Abstract: Air levitation devices have been employed for teaching and research in control theory. Its nonlinear and integrative dynamics impose a sufficient challenge to generate learning and enable validation of control techniques. While the literature has focused on a single levitator, the present work seeks to investigate a double air levitation device, which consists of two interconnected single levitators, so that the action of one fan interferes with the other. The production of the double device is detailed and, in order to demonstrate the functionality of the device, two controllers were implemented using an Arduino board. In particular, the difference between a decentralized and a decoupling control was investigated. The study found that given a significant coupling of the system, the use of a decoupler is responsible for a significant improvement in the responses of the system, thus showing the value of the device for the study of control techniques for multivariable systems. Furthermore, all of the files and procedures for reproducing the module are available, to support an open science approach of control theory.

Resumo: Levitadores pneumáticos são dispositivos largamente utilizados para ensino e pesquisa na teoria de controle. Sua dinâmica não-linear e integradora impõe um desafio suficiente para gerar aprendizado e possibilitar a validação de técnicas de controle. Enquanto a literatura tem se debruçado sobre um levitador singelo, o presente trabalho busca ampliar o campo de estudos dos levitadores trazendo um módulo didático duplo, o qual é constituído por dois levitadores singelos interligados, de modo que a atuação de um ventilador interfira no outro. Sua fabricação é detalhada e, de modo a demonstrar a funcionalidade do dispositivo, implementa-se dois controladores utilizando uma plataforma Arduino. Em particular, investigou-se a diferença entre dois controladores PI descentralizados e com o uso de desacoplador. O estudo constatou que dado um acoplamento significativo do sistema, o uso de um desacoplador é responsável por uma melhora significativa nas respostas do sistema, mostrando, assim, o valor do dispositivo para o estudo de técnicas de controle para sistemas multivariáveis. Além disso, todos os métodos necessários para reproduzir o módulo estão disponíveis, afim de apoiar a ciência aberta.

Keywords: Pneumatic levitation device, decoupler, automatic control.

Palavras-chaves: Levitador pneumático, desacoplador, controle automático.

1. INTRODUÇÃO

A levitação pneumática é o processo pelo qual um objeto é erguido sem suporte mecânico em uma posição estável, provendo através de um fluxo de ar uma força para cima que se contrapõe à força gravitacional exercida no objeto. Utilizando esse princípio, os levitadores pneumáticos têm

sido uma planta didática para estudo de sistemas de controle automático largamente utilizados no ensino de engenharia. Em particular, tais sistemas apresentam dinâmicas rápidas, que os tornam especialmente interessantes para experimentos de laboratório de controle. Adicionalmente, este tipo de sistema pode ser construído de forma relativamente barata, em termos de custo e esforço, desde que se esteja disposto a abrir mão de um pouco de exatidão no

^{*} Os autores agradecem ao Instituto Federal de Rondônia pelo financiamento através do Edital nº 19/2020/PVCAL.

sistema, conforme Chacon et al. (2017). Um exemplo de um levitador pneumático pode ser visto na Figura 1

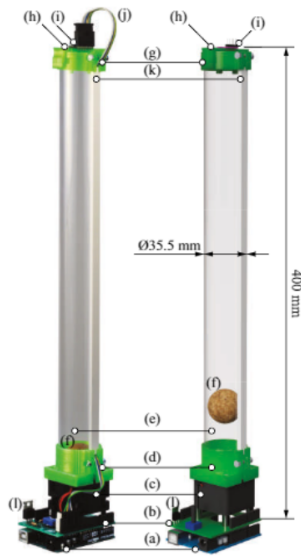


Figura 1. Levitador pneumático modular open source FloatShield. Fonte: Takács et al. (2020)

Na literatura, tais sistemas têm seu uso examinado, tanto como uma plataforma didática para o ensino de teoria de controle, quanto como um *benchmark* para leis de controle avançadas, adaptativas e não-lineares Takács et al. (2020).

Em Escano et al. (2005), foi descrito um controle de posição de um levitador pneumático, onde uma bolinha é levitada por um soprador, de fluxo variável, controlado por um driver de velocidade. O sistema foi utilizado como um benchmark de estratégias de controle. No trabalho foram comparados os desempenhos de controladores PID clássicos, H-infinito robusto e fuzzy, incluindo experimentos de rastreamento de referência e rejeição de distúrbios.

No trabalho de Caro e Quijano (2011), é discutida a utilidade do experimento de levitação pneumática como uma plataforma de ensino e pesquisa em controles clássicos e avançados. Neste artigo, o experimento é modificado utilizando uma componente horizontal. Questões físicas e do modelo dinâmico são analisadas. Foram ainda implementados um controle PID SISO e um controle fuzzy.

Em Rodríguez-Zalapa et al. (2014), o sistema é utilizado com realimentação por visão computacional, mostrando as virtudes do controle fuzzy em sistemas não-lineares com incertezas, quando comparados com controladores PID tradicionais.

Em Chacon et al. (2017), é apresentado um estudo sobre diferentes controladores PI não-lineares usando um sistema de levitação pneumática para aplicar os estudos. A comparação é feita com índices de desempenho bem conhecidos na literatura, onde os dados extraídos do experimento são computados e os resultados mostram que as modificações não-lineares podem ser úteis para compensar as não-linearidades do processo.

No trabalho de Cholodowicz e Orłowski (2017) um levitador pneumático de baixo custo foi apresentado como uma ferramenta de ensino para engenharia de controle.

O sistema foi desenvolvido para demonstração em sala de aula e práticas de laboratório, com um sistema simples, composto de um Arduino Mega 2560, eletrônica barata e estrutura montada em acrílico, metal e peças impressas em 3D. No experimento, o sistema foi identificado como um simples integrador e foi controlado com um controle PID.

Já em Chaos et al. (2020), é proposto um controlador chaveado robusto para um levitador pneumático com capacidade de medição limitada. É mostrado que a saída do sistema é global e uniformemente limitada com um limite arbitrariamente pequeno, através de simulações e experimento prático da robustez do controlador à presença de distúrbios e incertezas de modelo.

Em Takács et al. (2020), um levitador pneumático foi construído para ser um shield Arduino, compatível para conexão direta na plataforma de prototipagem de sistemas microcontrolados. O projeto faz parte de uma iniciativa para o desenvolvimento de shields para Arduino de modo que os estudantes tenham “um laboratório de controle na palma da mão”. O hardware desenvolvido usa componentes eletrônicos comuns e partes mecânicas impressas em 3D. O software disponibilizado inclui códigos para o Arduino, Matlab e Simulink.

Observando a literatura citada, bem como os demais trabalhos que os autores tiveram acesso, verifica-se que todos os levitadores pneumáticos seguem uma estrutura muito semelhante de montagem, a qual conta com o motor posicionado na parte inferior, soprando o ar para dentro do tubo. Em Souza et al. (2020), foi apresentado o primeiro levitador pneumático reverso, uma variação do levitador pneumático convencional, onde o motor é posicionado na parte superior do tubo, sugando o ar de dentro do tubo. Neste trabalho foi discutida a modelagem do sistema e mostrou-se que o problema de controle do levitador reverso é equivalente ao do levitador convencional, abrindo assim uma nova possibilidade de abordagem construtiva.

Objetivando construir uma planta didática capaz de ser empregada no estudo e validação de técnicas de controle multivariável, este trabalho propõe e apresenta a construção de um levitador pneumático reverso duplo, uma expansão do trabalho anterior, com duas torres acopladas pneumaticamente, de modo que um atuador interfira no outro. Segundo o melhor conhecimento dos autores, este problema ainda não foi tratado na literatura. Assim, seguindo os ideais da ciência aberta, o presente estudo irá contribuir com a metodologia completa de construção do módulo e, afim de validar sua eficiência, a aplicação de duas técnicas de controle no sistema proposto.

Deste modo, o trabalho está estruturado como segue: na seção de montagem é descrita a montagem de um protótipo de um levitador duplo; na seção seguinte é discutida a relevância do controle multivariável; na quarta seção, resultados e discussão, examina-se os dados levantados durante o experimento; finalmente, na última seção, são traçadas conclusões sobre os achados.

2. MONTAGEM

Tendo por base os trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, foi desenvolvido no âmbito do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Rondônia, Campus

Porto Velho Calama, uma plataforma didática de levitador pneumático duplo, conforme representado na Figura 2

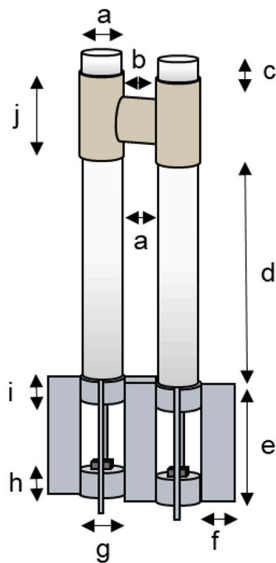


Figura 2. Representação de montagem. (a) 50mm. (b) 48mm. (c) 40mm. (d) 500mm. (e) 200mm. (f) 40mm. (g) 52mm. (h) 40mm. (i) 40mm. (j) 120mm. Fonte: Autoria própria

O sistema desenvolvido teve como uma de suas prioridades o baixo custo, portanto utilizou-se retalhos de chapas de PS (poliestireno) e de acetato para compor sua estrutura, porém, também se fez necessário o uso de algumas peças impressas em impressora 3D usando filamento ABS. Os tubos são feitos em acetato cristal enrolado em forma de cilindro e colado com cola instantânea, de modo a possibilitar a visualização do objeto flutuado, uma bolinha de pingue-pongue em cada tubo. A base é feita com retalhos de PS retangulares, alguns dos quais são enrolados para formar uma base circular. A base é montada utilizando cola instantânea. Para cada tubo, a fim de medir a altitude da bolinha, é usado um sensor infravermelho 2y0a21 da Sharp e como atuador, um motor DC com escovas para modelismo. Cada motor é chaveado através de um transistor Vishay Siliconix MOSFET IRF540 e o controle é embarcado em um Arduino, uma placa de prototipagem de microcontrolador 8 bits de baixo custo. O acoplamento pneumático entre as duas torres é realizado por meio de uma peça impressa em ABS com o formato de 'H' e, fabricado com o mesmo material, temos o suporte do motor. Note-se que o soprador foi montado no topo da coluna, sugando a bolinha de pingue-pongue, ao invés de soprá-la, como visto comumente, e portanto, o sensor foi montado, também, de forma inversa, colocado na base do módulo. Na Figura 4 tem-se o acoplamento e o suporte do motor em detalhe. Os arquivos para a impressão 3D dos mesmos estão disponíveis no link: <https://www.thingiverse.com/thing:4872347>, de modo a facilitar a reprodução do módulo. Na Figura 3 podemos observar o sistema na fase final de montagem.

O circuito de controle de cada torre foi montado de acordo com o esquemático da Figura 5. Nele é possível observar as conexões da fonte externa, do motor, das conexões



Figura 3. Sistema de levitação pneumática em fase de montagem. Fonte: Autoria própria

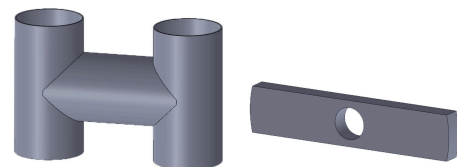


Figura 4. Acoplamento mecânico (esquerda). Suporte do motor (direita). Fonte: Autoria própria.

do sensor de altitude e do potenciômetro - que define o SetPoint - com o Arduino. O conector 1 do borne Arduino deve ser conectado ao GND da placa Arduino e também está conectado a todos os GNDs do circuito. O conector 2 deve ser conectado a uma porta PWM do Arduino, pois é por onde será enviado o sinal de controle do Arduino para o motor. Esse terminal está conectado ao gate do MOSFET que está em série com o motor, realizando o controle através do sinal PWM que vem do Arduino. Conectado à outra perna do motor estão a fonte e um capacitor, que é responsável por reduzir as oscilações de tensão na fonte. O conector 3 precisa ser conectado a uma entrada analógica do Arduino, pois é aqui que será lido o sinal do sensor. Na outra extremidade do circuito desse terminal está conectado o sensor de altitude, e entre elas está um filtro RC passa baixa, composto pelo capacitor C1 e o resistor R1, com a frequência de corte de aproximadamente 16Hz. O conector 4 também deve ser conectado a uma entrada analógica do Arduino, esse é o responsável por determinar o SetPoint. No circuito, o terminal é conectado ao potenciômetro RV1 que determina o valor do SetPoint variando a tensão nesse terminal, que tem o capacitor C3 associado em paralelo para garantir que o valor de tensão seja mais estável. Por fim, o conector 5 deve ser ligado à fonte de 5V direto do Arduino, pois esse conector é responsável por alimentar o sensor de altitude, como pode-se observar no circuito. Vale ressaltar que, apesar de o Arduino ter sido escolhido para a realização dos testes, o módulo didático não foi feito com o intuito de ser utilizado exclusivamente com ele, muito pelo contrário, foi projetado de modo a ser facilmente conectado a qualquer outro microcontrolador que possua as saídas e entradas necessárias.

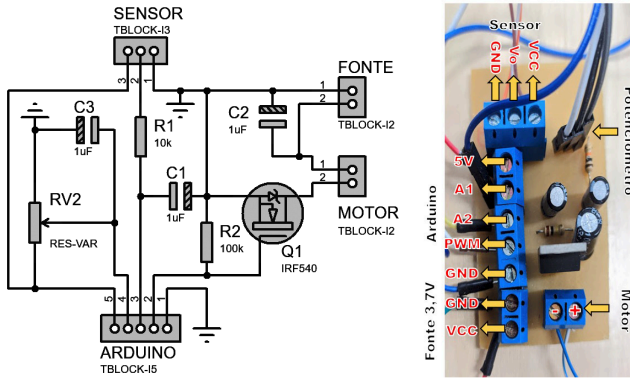


Figura 5. Diagrama esquemático. Fonte: Autoria própria

Para realizar a medição foi necessário linearizar a saída do sensor, obtendo uma função que converte o valor lido em tensão para o inverso da distância que, conforme Figura 6, é aproximadamente linear dentro da faixa de operação.

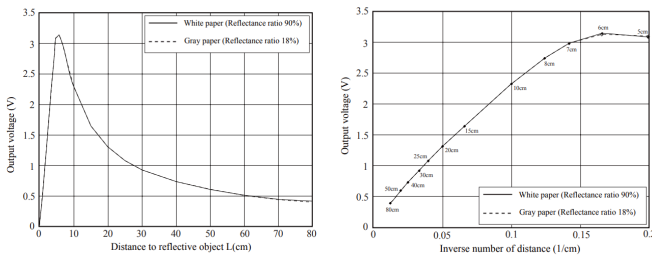


Figura 6. Resposta do sensor IR. Fonte: Datasheet 2y0a21.

Para encontrar a equação que descreve o comportamento do sensor, foram coletados os valores de tensão para os pontos $1/40\text{cm}$ e $1/10\text{cm}$ - do gráfico do inverso da distância - sendo $2,333\text{V}$ e $0,75\text{V}$ respectivamente. Partindo da equação da reta (1), encontrou-se o valor de a através da expressão (2).

$$Y = a \cdot X + b \quad (1)$$

$$a = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{2,333 - 0,75}{0,10 - 0,025} = 21,11 \quad (2)$$

Para encontrar o valor de b , os valores de a e de um outro ponto qualquer, foram substituídos na equação (1)

$$\begin{aligned} 0,75 &= 21,11 \cdot 0,025 + b \\ 0,75 - 21,11 \cdot 0,025 &= b \\ 0,22 &= b \end{aligned} \quad (3)$$

Com isso completou-se a equação (1), obtendo a equação da reta que gera uma aproximação satisfatória, à resposta do sensor, abrangendo toda a região que será utilizada.

$$Y = 21,11 \cdot X + 0,22 \quad (4)$$

De posse dessa equação, para se obter o valor da altitude real, em cm , foi calculada a inversa do resultado. Na Figura 7.

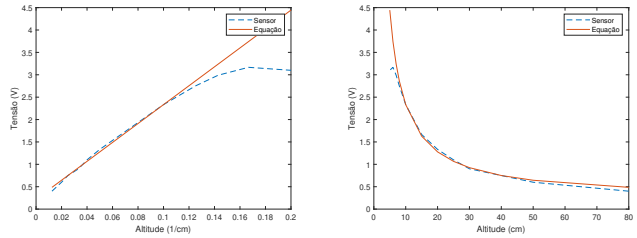


Figura 7. Gráfico da equação em comparação com a resposta real do sensor. Fonte: Autoria própria.

Considerando os materiais utilizados na montagem mecânica e da eletrônica necessária para a construção do módulo, seu custo total de fabricação de aproximadamente R\$ 150,00. Este valor informado não considera custos de mão de obra ou de operação dos equipamentos.

3. PROJETO DE CONTROLE

Nesta seção será apresentada a metodologia para o uso básico do módulo didático apresentado, contemplando a identificação através de resposta ao degrau, o projeto de controle pelo método de sintonia SIMC (Simple Internal Model Control) e o projeto do desacoplador do tipo feed-forward.

Para encontrar as funções de transferência que descrevem o sistema, foi empregado o método de identificação por resposta ao degrau. Para tal, foi escolhido um ponto de equilíbrio, para que as bolinhas fossem estabilizadas na altura mínima. Depois de um período, foi aplicado um degrau de 20% em uma das torres e foram registradas as respostas. O mesmo procedimento foi realizado na torre oposta. Nota-se que a resposta do sistema, em malha aberta, tem característica integradora: ao se aplicar um degrau acima do equilíbrio, observa-se a bolinha subindo até alcançar o limite superior, com velocidade aproximadamente constante. De posse dos dados, identificou-se o sistema como um IPDT (integral plus dead-time) TITO (two-input, two-output), onde cada elemento da matriz função de transferência é dado por:

$$G_{ij}(s) = \frac{K_{ij}}{s} \cdot e^{-L_{ij}s} \quad (5)$$

Onde K são os ganhos e L os atrasos de transporte. Os subíndices $i = 1,2$ e $j = 1,2$ se referem às saídas e entradas, respectivamente. O valor de K foi determinado aplicando os valores encontrados na curva da resposta ao degrau à fórmula (6), enquanto o valor de L foi obtido graficamente.

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U \cdot \Delta T} \quad (6)$$

As funções de transferência obtidas foram:

$$\begin{aligned} G_{11}(s) &= \frac{89,81}{s} \cdot e^{-1,75s}, & G_{12}(s) &= \frac{42,91}{s} \cdot e^{-1,75s} \\ G_{21}(s) &= \frac{47,00}{s} \cdot e^{-1,75s}, & G_{22}(s) &= \frac{102,50}{s} \cdot e^{-1,75s} \end{aligned} \quad (7)$$

A partir das funções de transferência identificadas, foi possível obter a matriz de ganhos relativos (RGA), que

permite fazer inferências sobre o acoplamento do sistema. Sabendo que para um sistema 2x2 o primeiro elemento da RGA é dado por:

$$\lambda_{11}(s) = \left(\frac{G_{11}(s)G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \right) \quad (8)$$

e considerando que o tempo morto é igual em todos os canais e que as quatro funções de transferência são integradores, podemos obter a matriz abaixo:

$$\Lambda(s) = \begin{bmatrix} 1,28 & -0,28 \\ -0,28 & 1,28 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

uma vez que a soma de cada linha e coluna da RGA deve ser unitária. Deste modo, é indicada a existência de acoplamento suficiente para sugerir a possibilidade do uso de um desacoplador, afim de melhorar o desempenho do sistema de controle.

De modo a se chegar em um controle de malha fechada, o controlador primário foi projetado utilizando o método SIMC (Simple Internal Model Control), através da regra para sistemas IPDT (Skogestad, 2003). De posse dos modelos da diagonal, G_{11} e G_{22} , foram projetados dois controladores PI conforme prescrito no SIMC, encontrando o K_c e o T_i do controlador utilizando as seguintes equações:

$$K_c = \frac{1}{k'} \cdot \frac{1}{(\tau_c + L)}, \quad T_i = 4(\tau_c + L), \quad (10)$$

sendo k' o ganho do processo, τ_c a constante de tempo de malha fechada desejada e L o atraso de transporte.

Deste modo, temos:

$$C_{11} = K_{C11} \cdot \frac{(T_{i11} \cdot s + 1)}{(T_{i11} \cdot s)}, \quad C_{22} = K_{C22} \cdot \frac{(T_{i22} \cdot s + 1)}{(T_{i22} \cdot s)} \quad (11)$$

$$C_{11} = 0,0135 \cdot \frac{(18 \cdot s + 1)}{(18 \cdot s)}, \quad C_{22} = 0,018 \cdot \frac{(16 \cdot s + 1)}{(16 \cdot s)} \quad (12)$$

Implementando diretamente estes controladores, chega-se em uma estrutura de controle descentralizada, apresentada na Figura 8. No diagrama de blocos, R_1 é o Setpoint da torre da esquerda. Desse é subtraído o valor da altitude da bolinha da torre da esquerda (Y_1), resultando no valor do erro (E_1). O erro passa pelo controlador (C_1), que determina a potência do motor 1 (U_1) que irá passar pela planta (G_{11}) e, ao ser somado com a influência vinda do motor da outra torre ($U_2 \cdot G_{12}$), resultará na altitude da bolinha da torre 1. Influência essa que reforça a existência do acoplamento encontrado na equação (9). A mesma análise serve para a torre oposta.

De modo a promover o desacoplamento, foi escolhido um feedforward do tipo:

$$C_{ij}(s) = \frac{-G_{ij}(s)}{G_{ii}(s)}, \quad (13)$$

onde G_{ij} é uma função de transferência da diagonal secundária e G_{ii} é a função de transferência da diagonal principal para a i -ésima saída. Uma vez que

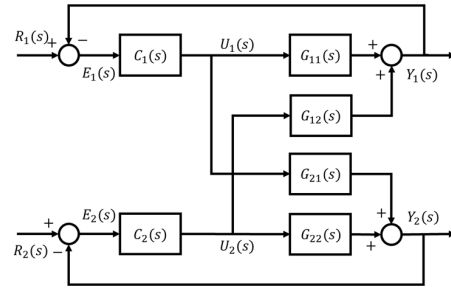


Figura 8. Diagrama de blocos do sistema TITO com controle descentralizado. Fonte: Autoria própria

$$Y_i(s) = G_{ii}(s)U_i(s) + G_{ij}(s)U_j(s), \quad (14)$$

onde $Y_i(s)$ é a saída i , um $U_i(s)$ é o i -ésimo sinal de controle e $U_j(s)$ o j -ésimo sinal de controle. Assim, ambas as manipuladas afetam cada uma das variáveis de processo.

Fazendo

$$U_i(s) = C_{ii}(s)E_i(s) + C_{ij}(s)C_{jj}(s)E_j(s), \quad (15)$$

sendo $E_i(s)$ o sinal do erro para a i -ésima saída e contabilizando a segunda ação de controle, também, ter-se-á:

$$Y_i(s) = G_{ii}(s)C_{ii}(s)E_i(s) + G_{ii}(s)C_{ij}(s)C_{jj}(s)E_j(s) + G_{ij}(s)C_{jj}(s)E_j(s) + G_{ij}(s)C_{ji}(s)C_{ii}(s)E_i(s). \quad (16)$$

Assim, aplicando (13):

$$Y_i(s) = G_{ii}(s)C_{ii}(s)E_i(s) - G_{ii}(s)\frac{G_{ij}(s)}{G_{ii}(s)}C_{jj}(s)E_j(s) + G_{ij}(s)C_{jj}(s)E_j(s) - G_{ij}(s)\frac{G_{ji}(s)}{G_{jj}(s)}C_{ii}(s)E_i(s). \quad (17)$$

Fazendo o cancelamento, tem-se a resposta desacoplada:

$$Y_i(s) = (G_{ii}(s) - G_{ij}(s)\frac{G_{ji}(s)}{G_{jj}(s)})C_{ii}(s)E_i(s), \quad (18)$$

realizando, portanto, o desacoplamento.

Assim, no caso particular do levitador duplo, como para o modelo identificado todos os atrasos são iguais e todas as FTs são IPDTs, chega-se em desacopladores estáticos:

$$C_{12}(s) = -0,4773, \quad C_{21}(s) = -0,4586. \quad (19)$$

A Figura 9, portanto, apresenta o diagrama de blocos completo do sistema. Ao analisar essa figura, deve-se realizar a mesma análise empregada na figura anterior, pois a única diferença entre elas é o acréscimo dos desacopladores (C_{12} e C_{21}), os quais tem como entrada uma ação de controle e a saída ligada à outra, demonstrando o funcionamento dos desacopladores.

Com os controladores projetados, os mesmos foram discretizados por Tustin e implementados em um Arduino UNO. Este último ficou responsável por fazer a leitura dos sensores, calcular as ações de controle e, por fim, entregá-las à placa de controle através de sinal PWM.

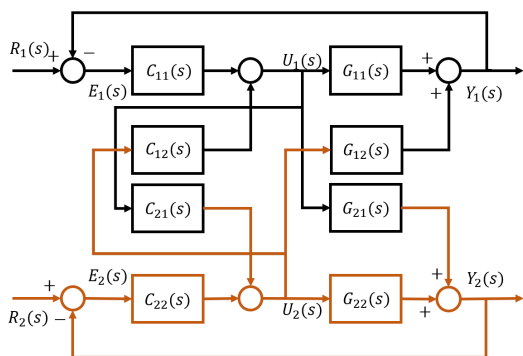


Figura 9. Diagrama de blocos com o sistema TITO com controle dotado de desacoplador. Fonte: Autoria própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a sintonia dos controladores PI, conseguiu-se uma resposta capaz de rastrear o SetPoint e rejeitar perturbações, porém bastante oscilante. Figura 10. Ao aplicar o desacoplador, obteve-se uma resposta mais rápida e menos oscilante. Figura 11

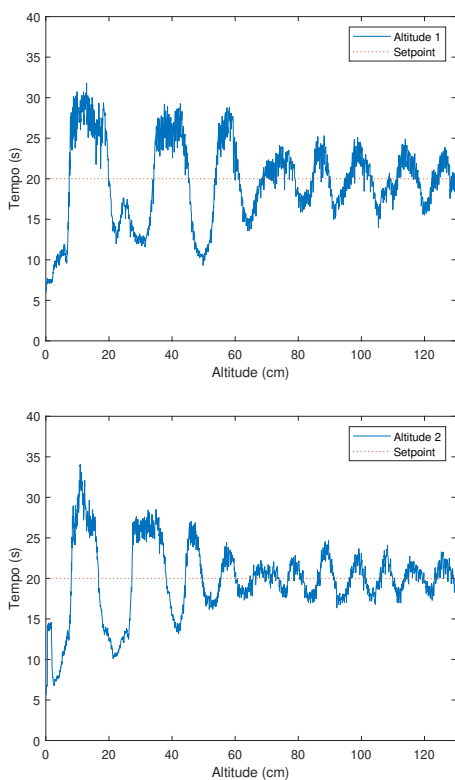


Figura 10. Resposta do sistema com o controlador PI descentralizado. Altitude 1: torre esquerda. Altitude 2: torre direita.

Reiterando, como o sistema é acoplado mecanicamente, a ação de controle de cada atuador influencia no adjacente, gerando um distúrbio que o atrapalha. No primeiro caso (Figura 10) após o degrau no instante 0, o sistema oscila com uma amplitude decrescente até os 60 segundos, quando ele oscila com uma amplitude limitada ao redor da origem. Nota-se pela diferença de fase entre as respostas

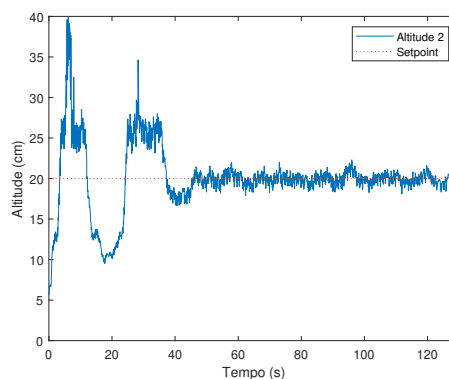
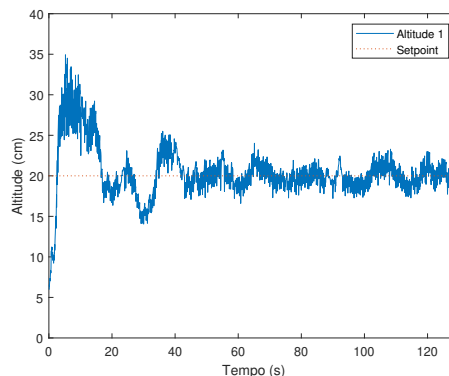


Figura 11. Resposta do sistema com o desacoplador. Altitude 1: torre esquerda. Altitude 2: torre direita.

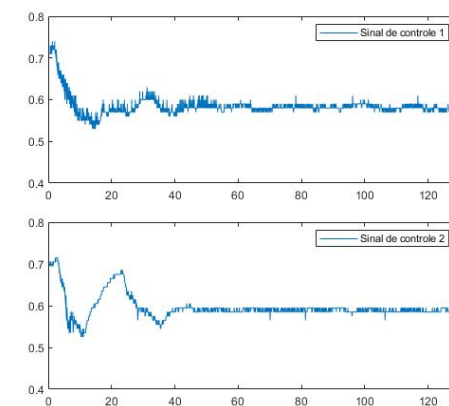


Figura 12. Sinal de controle. Sinal 1: torre esquerda. Sinal 2: torre direita.

de ambas as torres que a oscilação remanescente é causada pelo conflito entre os dois controladores. Já no segundo caso (Figura 11) após o degrau no instante 0, o sistema inicia seu regime transitório até os 40 segundos, quando ele entra em regime permanente. Como nesse caso a influência de um controlador no outro é mínima, o sobressinal do regime transitório é maior, porém a amplitude das oscilações em regime permanente são atenuadas significativamente, como é indicado através das métricas de desempenho. A (Figura 12) nos mostra que a saída do controlador não é saturada em momento algum. Como métrica de desempenho foram empregados o ISE (integral do erro quadrático) e o ITAE (integral do valor absoluto do erro ponderado no tempo) penaliza erros que persistem por longos períodos de tempo.

	ISE1	ISE2	ITAE1	ITAE2
Caso I	$2,2390 \cdot 10^3$	$1,8128 \cdot 10^3$	$1,2017 \cdot 10^7$	$8,7041 \cdot 10^6$
Caso II	$1,1342 \cdot 10^3$	$1,5809 \cdot 10^3$	$5,2857 \cdot 10^6$	$5,0097 \cdot 10^6$

Tabela 1. Métricas de desempenho. Caso I: controle PI descentralizado. Caso II: controle com desacoplador.

O ISE gera uma penalidade maior para erros maiores, uma vez que usa o erro ao quadrado. O ITAE penaliza menos os erros do regime transitório e mais os do regime permanente, já que multiplica o módulo do erro pelo tempo.

pode-se observar na tabela 1 que em ambos os critérios de desempenho, o controlador sem o desacoplador teve um resultado pior. Para o primeiro critério, como o sistema sem o desacoplador tem uma amplitude de oscilação - em regime permanente - maior, sua penalização também é maior que a do sistema desacoplado. Já no segundo critério, que penaliza mais com o passar do tempo, como o sistema com o desacoplador leva menos tempo para atingir o regime permanente e tem amplitude menor, de oscilação, é menos penalizado.

No link <https://youtu.be/jnv6mZcnQ1o>, também disponibilizado no código QR da Figura 13, pode-se visualizar o funcionamento do sistema.



Figura 13. Vídeo de funcionamento do sistema. Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi pioneiro ao apresentar a construção de um levitador pneumático reverso duplo acoplado, o qual associa o recentemente abordado conceito de reversão da estrutura, colocando o motor na parte superior da planta, com o conceito não antes abordado de acoplamento pneumático em levitadores. Com o intuito de possibilitar a reprodução desta plataforma, examinou-se os componentes utilizados, bem como os materiais da estrutura e suas dimensões. Disponibilizou-se, igualmente, os arquivos para a impressão 3D das peças cuja fabricação se tornaria mais complexa com outra tecnologia, além do desenho 2D em escala e o código Arduino utilizado. O custo aproximado de montagem do protótipo foi de R\$ 150,00, sendo este o valor para sua montagem em Porto Velho, Rondônia, de modo que o custo pode ser reduzido em outras regiões do país com maior disponibilidade de matéria prima.

De modo a demonstrar sua funcionalidade, este estudo demonstrou a aplicação de dois controladores diferentes na planta didática proposta. Através de ensaios, foi possível determinar a dinâmica do processo e projetar os controladores PI, além dos desacopladores. Foi possível, também, observar a diferença na resposta do sistema com e sem o

uso dos desacopladores, bem como quantificá-la através de critérios de desempenho, reafirmando as vantagens de se usar um controle avançado em sistemas acoplados, sendo esta uma das conclusões a ser observada em seu uso didático, no ensino de controle multivariável, por exemplo. Adicionalmente, além de sua utilidade para o ensino, é possível inferir que o protótipo se presta ao uso na pesquisa em sistemas de controle multivariável, tendo em vista sua simplicidade, baixo custo de produção e mobilidade, ao mesmo tempo em que apresenta características desafiadoras, que podem pôr à prova técnicas de controle.

Além disso, o dispositivo é construído de maneira modular, de modo que pode ser desacoplado e utilizado separadamente, como dois levitadores singelos, sem a necessidade de fabricação de nenhuma nova peça, possibilitando utilizá-lo com o mesmo intuito dos levitadores citados na revisão bibliográfica.

Em trabalhos futuros pretende-se realizar comparações mais detalhadas entre diferentes técnicas de controle multivariável, explorar as diversas aplicações didáticas do mesmo, analisar o impacto do uso desse módulo didático no ensino de controle avançado, bem como a possibilidade de construir um sistema triplo.

REFERÊNCIAS

- Caro e Quijano, Claudia e Quijano, N. (2011). Low cost experiment for control systems. In *IX Latin American Robotics Symposium and IEEE Colombian Conference on Automatic Control, 2011 IEEE*, 1–6. IEEE.
- Chacon, J., Saenz, J., Torre, L.D.I., Diaz, J.M., and Esquembre, F. (2017). Design of a low-cost air levitation system for teaching control engineering. *Sensors*, 17(10), 2321.
- Chaos, D., Chacón, J., Aranda-Escolástico, E., and Dormido, S. (2020). Robust switched control of an air levitation system with minimum sensing. *ISA transactions*, 96, 327–336.
- Cholodowicz e Orłowski, Ewelina e Orłowski, P. (2017). Low-cost air levitation laboratory stand using matlab/simulink and arduino. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 21.
- Escano, J.M., Ortega, M.G., and Rubio, F.R. (2005). Position control of a pneumatic levitation system. In *2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, volume 1, 6–pp. IEEE.
- Rodríguez-Zalapa, O., Hernández-Zavala, A., and Huerta-Ruelas, J.A. (2014). Fuzzy controller for a pneumatic positioning nonlinear system. In *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 370–381. Springer.
- Souza, R.P.D., Luna, J.D.F.d.O., and Helena, F.G. (2020). Lmodelagem e controle de um levitador pneumático reverso. In *2º SETER - Seminário de Engenharia e Tecnologia de Rondônia*. SETER - Seminário de Engenharia e Tecnologia de Rondônia.
- Takács, G., Chmurčiak, P., Gulán, M., Mikuláš, E., Kuhlánek, J., Penzinger, G., Vdoleček, M., Podbielančík, M., Lučan, M., Šálka, P., et al. (2020). Floatshield: An open source air levitation device for control engineering education. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 17288–17295.