

Uma bancada didática de baixo custo para ensino de controle mid-ranging

1º Lucas Tavares Viana de Souza
Eng de Controle e Automação
Instituto Federal de Rondônia
Porto Velho, Brasil
lucastvspvh90@gmail.com

2º Luiz Medeiros Barros
Coordenação de Eletrotécnica
Instituto Federal de Rondônia
Porto Velho, Brasil
barros.luiz@estudante.ifro.edu.br

3º Kariston Dias Alves
Eng de Controle e Automação
Instituto Federal de Rondônia
Porto Velho, Brasil
kariston.alves@ifro.edu.br

4º José Diogo Forte de Oliveira Luna
Eng de Controle e Automação
Instituto Federal de Rondônia
Porto Velho, Brasil
jose.luna@ifro.edu.br

Resumo—O mid-ranging control, também conhecido como valve position control, é uma técnica de controle avançado clássico capaz de lidar com sistemas TISO (two-inputs, single-output). Esta estratégia busca coordenar os dois atuadores usualmente com ganhos estáticos diferentes. O atuador menor é utilizado para responder a pequenos desvios de forma rápida, sendo responsável por um ajuste fino do seguimento de referência, enquanto o atuador maior se move mais lentamente, buscando, em regime permanente, levar o atuador menor para uma posição desejada. Esta posição normalmente é a metade da faixa do atuador, o que justifica o nome da técnica. Apesar de sua importante gama de aplicação em uma série de processos no ambiente industrial, não há, na literatura do ensino de controle, propostas de experimentos práticos para abordar esse esquema de controle em sala de aula. Objetivando sanar esta lacuna, o presente estudo apresenta o desenvolvimento de uma bancada de baixo custo para o ensino de controle mid-ranging, apontando materiais necessários e disponibilizando os arquivos utilizados no corte a laser das peças. Adicionalmente, a aplicabilidade da bancada é ilustrada com exemplos de identificação de sistemas e projeto de controle mid-ranging. Finalmente, é mostrado que a bancada atende requisitos necessários para um bom experimento prático.

Palavras-Chave—mid-ranging, controle automático, sistemas TISO, bancada didática.

I. INTRODUÇÃO

É aceitável que a realização de experiências práticas é uma oportunidade valiosa para desenvolver as habilidades que estão alinhadas com o perfil do aluno que se pretende formar. Conforme [1], um bom experimento de laboratório deve expor ideias teóricas refletir importâncias problemas do mundo real, dar sensações acústicas e visual, ter um adequado tempo de escala e experimentação, ser barato, fácil de entender e utilizar, além de não expor discente a perigos.

Como exemplo de trabalhos que propõem experimentos populares que levam em conta o que é dito por Balchen, pode ser citados os estudos de [2], [3], [4] que propuseram plataforma didáticas para controle de velocidade de motores CC, [5], [6] e [7], [8], [9], [10] e [11] fizeram plantas didáticas de controle de temperatura, [12] fez uma plataforma didática de controle de fluxo de ar, [13] e [14] trabalharam com levitador magnéticos, [15]. [16] propôs uma plataforma

do tipo bola e barra, propuseram plataformas didáticas com controle de nível em tanques simples, [17], [18], [19], [20] e [21] produziram plataformas didáticas de tanques acoplados. Especificamente quanto a controle de nível, diversos autores propõe sistemas que envolvem o controle de nível em tanques. Um dos mais proeminentes é o sistema de tanque quádruplo, estudo em trabalhos como o de [22], que fornece uma configuração experimental com uma interface dedicada e código aberto para educadores. O custo, porém, para sua produção foi da ordem de 650 euros.

Apesar do grande número de trabalhos que propõe recursos para o ensino de controle monovariável, o número de estudos sobre ensino de controle avançado clássico é significativamente menor. Especificamente, há poucos estudos tratando o ensino de controle para sistemas TISO (two input, single output), como controle split-range e mid-ranging control. Quanto ao ensino de controle split-range, existe, por exemplo, o trabalho de [23], porém, segundo o melhor conhecimento dos autores, não há na literatura de controle nenhum trabalho focado no ensino de controle mid-ranging.

Os sistemas TISO surgem no controle de processos em ocasiões onde são necessários dois atuadores para cobrir toda a faixa de regime permanente de uma mesma variável de processo. E uma série de autores tem se debruçado sobre o tema em trabalhos recentes tais como [24], [25], [26] e [27].

Para sistemas TISO, conforme [28], existem três abordagens principais no seu controle, sendo elas: o uso de controladores independentes para cada atuador, o uso de controle split-range e o uso de controle mid-ranging.

O controle split-range [28] está em uso a mais de 75 anos, e nesse período outros nomes foram dados a ele como por exemplo, dual control agent, range extending e valve sequencing. O split-range, pode ser usado para estender o regime permanente, quando a entrada primária atinge seu limite, chaveando para o segundo atuador. É utilizado quando se quer priorizar um atuador cujo uso seja mais econômico, por exemplo. Entretanto, o controle split-range pode apresentar desempenho insatisfatório perto da região de transição entre os atuadores, onde, normalmente, têm um comportamento

mais não-linear. Adicionalmente, alguns sistemas, como o caso de bombas conectadas em série a válvulas, não permitem o sequenciamento dos atuadores, exigindo que ambos sejam manipulados simultaneamente.

No controle mid-ranging surge, então, como uma alternativa para lidar com este problema, uma vez que ele coordena ambas as entradas simultaneamente [29]. Desde sua primeira aparição na literatura em [30], o controle mid-ranging tem sido descrito por diferentes nomes ao longo dos anos. Conforme relatado em [24] and [31], os termos "valve position control", "heading parallel control", "coordinated control", "input resetting control" e "habituating control" já foram usados para tratar esta técnica.

Para evitar o comportamento indesejado do split-range, o controle mid-ranging visa coordenar as duas entradas simultaneamente [25]. A saída é sempre controlada pela mesma entrada, u_1 , que é atribuída como o atuador com o ganho menor, enquanto a segunda entrada, u_2 , atua para manter a primeira em 50%, daí o nome mid-range control [32]. Esse esquema é mostrado na Figura 1.

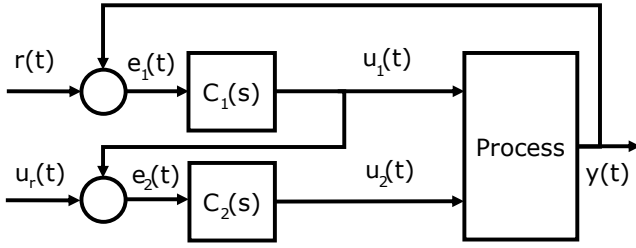


Fig. 1. Representação do diagrama de blocos do esquema Mid-ranging Control.

O raciocínio para a configuração é o seguinte: o atuador menor é usado para realizar ajustes finos e rejeitar distúrbios rápidos, enquanto o atuador maior lentamente leva o primeiro de volta à sua posição em 50%. Isso significa que, a menos que u_2 esteja saturado, o primeiro atuador descansará, em estado estacionário, longe das regiões mais não-lineares de sua faixa. Isso é ilustrado na Figura 2 onde em cenários de demanda de entrada pequena o atuador menor controla sozinho a saída. A partir do ponto em que o primeiro atuador atinge a posição de repouso desejada, o meio de sua faixa, por exemplo, a segunda entrada começa a agir para atender se a demanda de entrada excedente estiver em estado estacionário. Somente se o segundo atuador ficar saturado, a primeira entrada subirá acima do meio de sua faixa para fornecer cobertura completa de alcance em estado estacionário.

A escolha do valor de estado estacionário desejado para u_1 , u_r em si, é feita em relação às especificidades do processo. Enquanto escolhê-lo no meio da faixa evita que o primeiro atuador opere em uma região mais não-linear, em alguns casos, onde processo requeira, um valor maior de u_r pode ser escolhido. [27] exemplifica esse caso com uma aplicação na indústria de papel e celulose em que uma válvula (u_1) em série com uma bomba com acionamento de frequência variável (u_2) é usada para controlar a pressão da linha de alimentação.

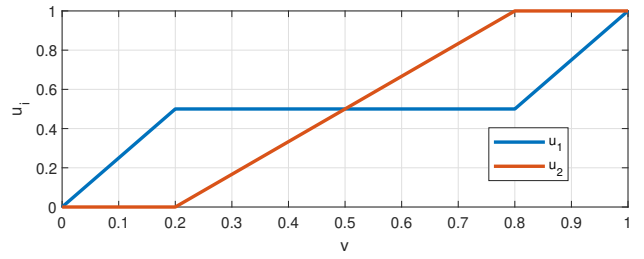


Fig. 2. Estado estacionário de ambas as entradas sobre a faixa de controle total sob um esquema de controle de faixa intermediária.

Quanto à sintonia dos controladores, C_1 é sintonizado como uma malha SISO comum e, para não perturbar o comportamento dinâmico da primeira malha, o segundo controlador C_2 deve ser sintonizado para uma resposta bastante lenta, tradicionalmente com ação integral pura. A escolha de um controlador I-puro é justificada pela resposta lenta e desejada [29]. A possibilidade de usar o controle P-puro foi descartada em [24] já que a falta de ação integral causa desvios no estado estacionário de u_1 devido a mudanças no set-point r . Isso poderia ser minimizado aumentando o ganho proporcional, mas isso aproximaria a dinâmica da segunda malha da primeira, causando uma interação indesejada.

II. CONSTRUÇÃO DO MÓDULO

Para proceder a construção do módulo foram utilizados materiais de baixo custo elencados na Tabela I.

TABELA I
LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS.

Item	Quantidade	Custo Unitário
Mini bomba CC 12 V	3	R\$ 37,50
Sensor Ultrassônico HC-SR04	1	R\$ 12,50
Parafuso M3 x 10mm com porca	12	R\$ 0,15
Mangueira transparente 8mm PU	1,6 m	R\$ 4,25
Pote plástico Sanremo ref 694	1	R\$ 14,20
Caixa plástica 2,5l Pleion ref 0310	1	R\$ 7,90
Fonte Chaveada 12V 3A	1	R\$ 19,00
Transistor TIP 120	3	R\$ 2,50
Resistor 220 Ω	3	R\$ 0,05
Arduino UNO R3	1	R\$ 90,00
Protoshield Arduino	1	R\$ 18,50

Os transistores TIP 120 são utilizados para chavear as bombas. As bombas utilizadas são bombas CC (corrente contínua), de 12V, e sua corrente de trabalho varia de 0,5 a 0,7A. Duas das bombas são conectadas para bombear água do reservatório para o tubo e uma para bombear do tubo para o reservatório.

O sensor de distância ultrassônico HC-SR04 mede distâncias de 2cm a 4m, possui módulo emissor e receptor acoplados e 4 pinos (VCC, Trigger, ECHO, GND) para medição.

O pote plástico Sanremo ref 694, com dimensões de comprimento de 73,5mm, largura de 73,5mm e altura de 277mm e capacidade de 1347,5ml, ele emula um tanque cilíndrico, sendo enchido no topo por duas das bombas. O pote conta

com um furo no fundo para ser drenado por gravidade e, adicionalmente, uma mangueira é conectada entre o fundo dele e a sucção da terceira bomba, de modo que esta última atue como perturbação do sistema, representando uma variação na demanda.

A caixa plástica 2,5L Pleion referência 0310, com comprimento de 25,8cm, largura de 17,8cm, altura de 8,5cm, ela serve como base pro sistema, a parte interior funcionando como reservatório para a água que será bombeada e a tampa é cortada utilizando uma CNC laser para abrigar as bombas e o pote.

Para alimentar as três bombas, foi adotada uma fonte Chaveada 12V 3A.

O Arduino UNO R3, possui 14 entradas/saídas digitais (das quais 6 podem ser usadas como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, conexão USB, uma entrada para fonte, soquetes para ICSP, e um botão de reset. Para o projeto são utilizados três pinos PWM para comandar as bombas e mais dois pinos para a comunicação com o sensor. Finalmente, o protoshield Arduino é uma placa de expansão que traz os pinos de entrada e saída padrão do Arduino para os conectores além de uma matriz de contatos de 170 furos.

A montagem da bancada inicia com o recorte da caixa plástica 2,5L, pela corte a laser, conforme o desenho apresentado na Figura 3.

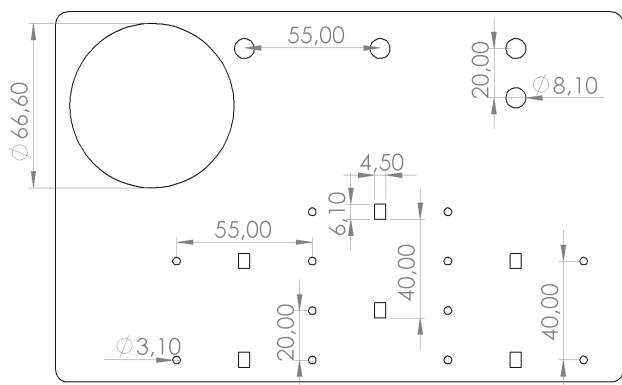


Fig. 3. Desenho dos recortes a serem feitos na tampa da caixa plásticas.

Alternativamente, os cortes podem ser feitos manualmente. Após o recorte, são adicionadas as três mini bombas CC 12V, que servirão como atuadores, sendo que dois dos atuadores são para a entrada do sistema e um simula o aumento da demanda da saída do tanque, se constituindo como uma perturbação. Após isso, é acoplado o pote plástico Sanremo, que terá como função ser um tanque cilíndrico que receberá a entrada d'água diretamente do reservatório, em sua tampa será aplicado o corte na CNC apresentado na Figura 4.

O corte é específico para receber as mangueiras através de duas aberturas, e as pontas das mangueiras serão acopladas às bombas que encherão o pote, e também cortes para acoplar o sensor Ultrassônico, que servirá para a leitura do nível do tanque cilíndrico.

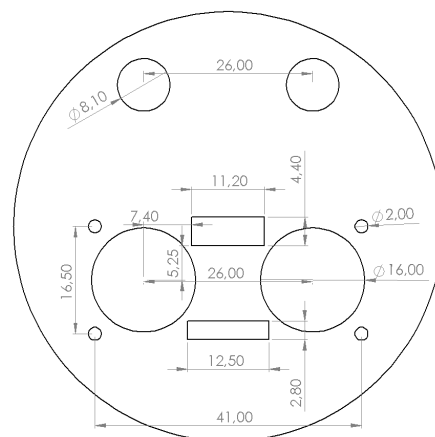


Fig. 4. Desenho dos recortes a serem feitos na tampa do pote plástico.

A bancada completa montada pode ser vista na Figura 5.

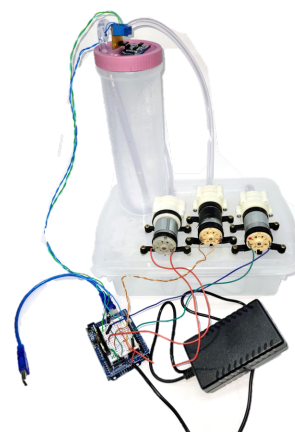


Fig. 5. Bancada proposta montada. As bombas e o sensor estão conectados a um Arduino UNO através do circuito discutido a seguir, o qual foi montado em um protoshield, um shield para Arduino dotado de uma matriz de contatos para prototipagem rápida.

Para permitir a fácil reprodução da bancada proposta, os arquivos para CNC corte a laser estão disponibilizados no link <https://github.com/TavaresLT/Bancada-didatica-para-ensino-de-mid-ranging-control.git>

O diagrama utilizado para comunicar o Arduino com as bombas e o sensor é apresentado na Figura 6. Dois pinos digitais são utilizados para ler o sensor e mais três pinos digitais com capacidade PWM são utilizados para comandar as bombas.

III. VALIDAÇÃO DO MÓDULO

De modo a validar a aplicabilidade do módulo em sala de aula, são ilustrados a seguir, duas das práticas que podem ser realizadas com a ferramenta proposta em sala de aula: a obtenção de um modelo linear do sistema e o projeto do controle mid-ranging, os quais envolvem habilidades esperadas

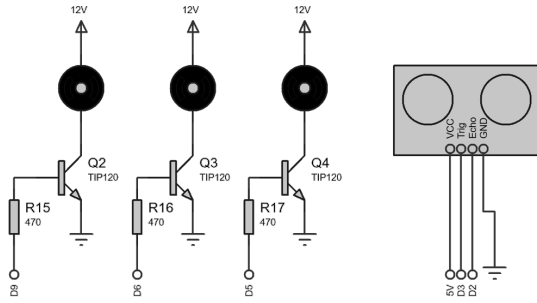


Fig. 6. Diagrama de ligação eletrônica proposto.

do estudante de uma disciplina de controle de processos a nível de engenharia.

A. Identificação de Sistemas

A primeira etapa para a realização do projeto de controle, para a maioria das técnicas clássicas, é a obtenção de um modelo dinâmico. Uma das formas de fazê-lo é através de técnicas de identificação de sistemas, obtendo um modelo a partir de dados de entrada e saída.

Sistemas TISO lineares podem ser descritos no domínio da frequência por:

$$Y(s) = G_1(s)U_1(s) + G_2(s)U_2(s), \quad (1)$$

onde Y representa a variável de processo, U_1 e U_2 as variáveis manipuladas e G_1 e G_2 são as funções de transferência que relacionam cada entrada com a saída.

A identificação de sistema, para um sistema estável em malha aberta, pode ser feita através de métodos determinísticos baseados em resposta ao degrau [33]. Analiticamente, sabe-se que, para um sistema de primeira ordem, o ganho estático é dado por:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U}, \quad (2)$$

onde ΔU é a amplitude do degrau aplicado no processo e ΔY é a variação da saída em regime permanente.

Adicionalmente, para um sistema de primeira ordem, a constante de tempo é dada pelo intervalo em que o processo leva para atingir 63,2% do valor de regime permanente. Assim, é possível obter a constante de tempo e o ganho estático do sistema a partir da curva de reação ao degrau.

Considerando que se trata de um sistema TISO, é necessário que se leve o sistema ao ponto de operação e se aplique um degrau de cada vez em cada canal, de modo que são obtidas duas curvas de reação.

O ensaio de resposta ao degrau é realizado ligando o sistema a um Arduino UNO com o circuito apresentado anteriormente. Os gráficos são levantados a partir da capacidade de comunicação serial da placa microcontrolada.

Após a análise dos gráficos, foram levantados os seguintes modelos com base nas respostas ao degrau:

$$G_1(s) = \frac{33,06}{31s + 1}, G_2(s) = \frac{50,27}{32s + 1}. \quad (3)$$

E, na Figura 7 é possível ver a comparação entre os dados experimentais e as respostas dos modelos.

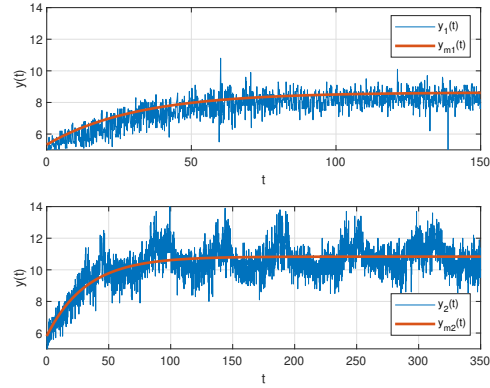


Fig. 7. Comparação entre a resposta ao degrau obtida experimentalmente e a resposta simulada dos modelos levantados.

A diferença significativa entre os ganhos dos dois canais pode ser atribuída ao uso de duas mini bombas CC de marcas diferentes no protótipo.

B. Projeto de controle mid-ranging

Em 2003, [27] propôs uma sintonia batizada de controle de posição de válvula modificado (MVPC, do inglês modified valve position control), para sanar a falta de um procedimento sistemático para ajustar este controlador I-puro, comumente utilizado no VPC.

Em sua proposta, supondo que a dinâmica entre u_1 e y , $G_1(s)$ pode ser adequadamente modelada como um modelo de primeira ordem, C_1 é escolhido como um controlador PI e é ajustado usando a regra lambda [34] então:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s)G_1(s)}{1 + C_1(s)G_1(s)} = \frac{1}{\lambda_y s + 1}, \quad (4)$$

onde λ_y é a constante de tempo de malha fechada desejada, na ausência de C_2 . Enquanto isso, a dinâmica para a segunda malha é encontrada como:

$$\frac{U_1(s)}{U_2(s)} = \frac{-G_2(s)C_1(s)}{1 + C_1(s)G_1(s)}, \quad (5)$$

onde $G_2(s)$ é a dinâmica entre $U_2(s)$ e $Y(s)$. Assumindo que possa ser modelada como um modelo de primeira ordem mais tempo morto, a função de transferência 5 se torna:

$$\frac{U_1(s)}{U_2(s)} = -\frac{K_2 \tau_1 s + 1}{K_1 \tau_2 s + 1} \frac{1}{\lambda_y s + 1} e^{-L_2 s}, \quad (6)$$

sendo K_i e τ_i são o ganho estático e constante de tempo de $G_i(s)$ e L_2 é o tempo morto. Então, os autores usam a redução do modelo proposta em [34] para encontrar:

$$\frac{U_1(s)}{U_2(s)} \approx \frac{K_{12}}{\tau_{12}s + 1}, \quad (7)$$

onde:

$$K_{12} = -\frac{K_2}{K_1}, \tau_{12} = \tau_2 - \tau_1 + \lambda_y + L_2, \quad (8)$$

desde que $\tau_{12} \gg L_2$. A estratégia MVPC passa a ajustar C_2 como um controlador PI para este modelo reduzido aplicando a regra lambda mais uma vez, então:

$$\frac{U_1(s)}{U_r(s)} = \frac{C_2(s)G_{12}(s)}{1 + C_2(s)G_{12}(s)} = \frac{1}{\lambda_u s + 1}, \quad (9)$$

e impõe uma escolha de $\lambda_u \gg \lambda_y$ para reduzir interações indesejadas entre as malhas.

Aplicando a técnica proposta na planta desenvolvida, de modo a ilustrar aos estudantes o impacto da seleção de λ_y no desempenho do controle em malha fechada, testa-se três valores incrementalmente menores. A título de exemplo, no presente estudo, adotou-se 30, 20 e 10 segundos, iniciando próximo da velocidade de malha aberta e reduzindo para dois terços e um terço. Em cada caso, foi adotado $\lambda_u = 5\lambda_y$.

Na Figura 8 é possível visualizar a resposta do sistema diante de mudanças consecutivas de set-point. Conforme o λ_y é diminuído, é perceptível a redução no tempo de subida e acomodação do sistema proporcional à constante de tempo de malha fechada selecionada.

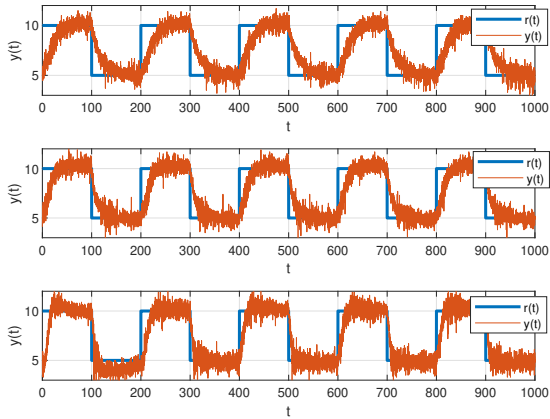


Fig. 8. Resposta do sistema para mudanças de setpoint com as sintonias obtidas de cima para baixo: $\lambda_y = 30$, $\lambda_y = 20$, $\lambda_y = 10$. Em azul o setpoint e em laranja a variável de processo.

Adicionalmente, é possível notar o efeito da escolha da constante de tempo de malha fechada no esforço de controle, conforme indicado na figura 9, tornando-se mais agressivo, a medida em que se reduz o λ_y . Pode-se destacar, ainda que a entrada u_2 sempre atua de modo a levar u_1 de volta para 0,5 em regime permanente.

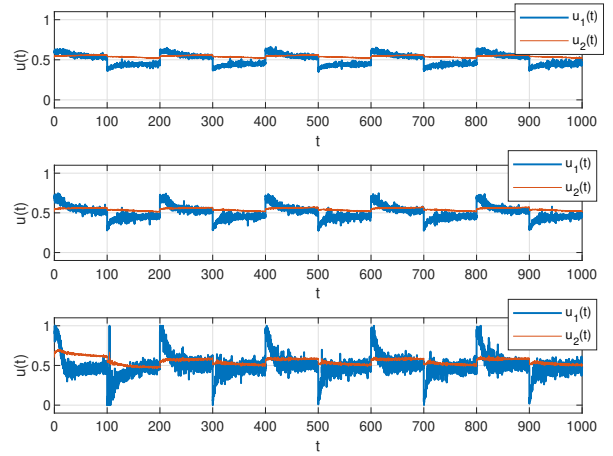


Fig. 9. Comportamento das variáveis manipuladas nas sintonias com, de cima para baixo: $\lambda_y = 30$, $\lambda_y = 20$, $\lambda_y = 10$. Em azul o comando da primeira bomba e em laranja o comando da segunda bomba.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os testes realizados com o módulo proposto, pode-se argumentar que a bancada é capaz de expor as ideias teóricas na medida em que traz ao estudante um sistema TISO de forma palpável. Adicionalmente, o sistema reflete problemas do mundo real, na medida em que emula um sistema de controle de nível com dois atuadores, como aquele relatado no trabalho de [35]. Ainda, o sistema proposto fornece feedback visual e acústico para o aluno, na medida em que o mesmo pode visualizar o nível da água variando no tubo e tem a percepção auditiva da variação da rotação da bomba, que está relacionada com a ação de controle comandada pelo controlador. Os testes da bancada, conforme ilustrados, tem duração adequada para ser realizados em uma aula de laboratório com duração convencional. Ademais, conforme apresentado, o sistema proposto tem custo reduzido, sendo possível montá-lo por apenas R\$290,85. Mais ainda, trata-se de um problema de fácil entendimento, uma vez que o controle de nível é um dos desafios mais clássicos dentro do controle automático. E, finalmente, pelo tamanho do processo e o uso apenas de dispositivos CC, a bancada proposta não expõe o estudante a nenhum risco. Assim, o sistema proposto atende completamente aos requisitos elencados por [1]. - Sobre o custo da bancada, o preço final foi de R\$290,85. Enquanto nos demais trabalhos citados sobre bancadas de controle de nível não há menção sobre o custo da mesma, o trabalho de [22], a título de comparação, teve custo de 650 euros, de modo que a bancada proposta se torna mais atrativa para os educadores que poderiam fabricar com esse valor uma quantidade maior de bancadas para seus alunos.

V. CONCLUSÃO

Ao se observar a literatura, é notável a ausência de estudos que se debruçam sobre a confecção de ferramentas para o

ensino do controle mid-ranging, uma técnica relevante para o controle de uma classe de sistemas TISO. No intuito de sanar esta lacuna, o presente trabalho objetivou apresentar uma proposta para o desenvolvimento de uma bancada de baixo custo para o ensino de controle mid-ranging.

A bancada desenvolvida foi construída a partir de materiais de baixo custo e facilmente acessíveis em território brasileiro, tendo um custo de R\$290,85. Foram exemplificadas suas funcionalidades através de práticas ilustrativas de sua aplicação em sala de aula e os arquivos necessários para a reprodução da mesma foram disponibilizados em plataforma online, sob a perspectiva de ciência aberta. Finalmente, foi argumentado que o projeto atende as especificações de um bom experimento, conforme os critérios elencados por [1].

Em trabalhos futuros deve-se validar a bancada em sala de aula, através de questionário com os alunos, sobre o impacto do sistema proposto no aprendizado. Finalmente, pode-se explorar outras aplicações de conteúdos à bancada, como na modelagem de sistemas dinâmicos, estabilidade de sistemas, estudos de resposta em frequência, entre outros. Pretende-se, também, utilizar a bancada para o ensino de outras técnicas de controle como o próprio split-range e controle preditivo baseado.

REFERÊNCIAS

- [1] Balchen, J. G., M. Handlykken, and A. Tysso. "The need for better laboratory experiments in control engineering education." *IFAC Proceedings Volumes 14.2* (1981): 3363-3368.
- [2] Cook, M.D., Bonniwell, J.L., Rodriguez, L.A., Williams, D.W., e Pribernow, J. (2020). Low-cost dc motor system for teaching automatic controls. In *2020 American Control Conference (ACC)*, 4283–4288. IEEE.
- [3] Wang, S., Zhang, F., Tang, Q., Zhang, X., & Zhao, R. (2021). A take-home motor control teaching experiment platform for control engineering-related courses. *IEEE Transactions on Education*, 65(2), 115-123.
- [4] Pedrisch, Rafael Oliveira and de Souza, Amanda Maria Monteiro Cerezini and Marinho, André Luiz Barbosa and Santos, Artur Vitorio Andrade and de Oliveira Luna, José Diogo Forte and Federal de Rondônia, RO. m Módulo Motor-Tacogerador de Baixo Custo para Ensino de Controle Automático.
- [5] BIEDA, Robert; BLACHUTA, Marian; GRYGIEL, Rafal. High performance PID control of a cascade tanks system as an example for control teaching. In: *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. IEEE, 2017. p. 803-808.
- [6] BLACHUTA, Marian; BIEDA, Robert; GRYGIEL, Rafal. High performance single tank level control as an example for control teaching. In: *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE, 2017. p. 1053-1058.
- [7] LI, Xiangshun; LI, Zhiang. The Application of linear and Nonlinear Water Tanks Case Study in Teaching of Process Control. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2018. p. 012165.
- [8] OLIVEIRA, Paulo Moura; HEDENGREN, John D. An APMonitor temperature lab PID control experiment for undergraduate students. In: *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 2019. p. 790-797.
- [9] SALAM, Peshraw; DOGAN, Ibrahim. An educational fuzzy temperature control system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 10, n. 3, p. 2463, 2020.
- [10] PARK, junho et al. Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control. *Computers & Chemical Engineering*, v. 135, p. 106736, 2020.
- [11] ORTIZ-VILLALBA, Diego. Virtual Festo MPS® PA Workstation for Level and Temperature Process Control. *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy: Proceedings of the CIT 2020 Volume 1*, v. 1, p. 164, 2021.
- [12] PILATASIG, Marco; CHACON, Galo; SILVA, F. Airflow station controlled by PID and fuzzy controllers using a low cost card for didactic uses in controllers' evaluation. In: *The 9th International Multi-conference on Complexity, Informatics and Cybernetics IMCIC*. 2018.
- [13] CZERWIŃSKI, Kamil; WOJTULEWICZ, Andrzej; ŁAWRYŃCZUK, Maciej. Fuzzy controller for laboratory levitation system: real-time experiments using programmable logic controller. *International Journal of Control, Automation and Systems*, v. 17, n. 6, p. 1507-1514, 2019.
- [14] ATAŞLAR-AYYILDIZ, B.; KARAHAN, O. Design of a MAGLEV System with PID Based Fuzzy Control Using CS Algorithm. *Cybernetics and Information Technologies*, v. 20, n. 5, 2020.
- [15] FABREGAS, Ernesto; DORMIDO-CANTO, Sebastián; DORMIDO, Sebastián. Virtual and remote laboratory with the ball and plate system. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 9132-9137, 2017.
- [16] KAGAMI, Ricardo Massao et al. A generic WebLab control tuning experience using the ball and beam process and multiobjective optimization approach. *Information*, v. 11, n. 3, p. 132, 2020.
- [17] GRANADO, Ernesto et al. A web-based virtual laboratory for teaching automatic control. *Computer Applications in Engineering Education*, v. 15, n. 2, p. 192-197, 2007.
- [18] YAO, Jason; LIMBERIS, Loren. A Project Driven Approach To Teaching Controls In A General Engineering Program. In: *2008 Annual Conference & Exposition*. 2008. p. 13.92. 1-13.92. 17.
- [19] JAAFAR, Hazriq Izzuan et al. Development of PID controller for controlling desired level of coupled tank system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, v. 3, n. 9, p. 32-36, 2014.
- [20] GRYGIEL, Rafal; BIEDA, Robert; BLACHUTA, Marian. Remarks on the coupled tanks apparatus as a control teaching tool. In: *2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. IEEE, 2016. p. 120-127.
- [21] RUIZ, J. M. et al. Implementation of a two-tank multivariable process for control education. In: *2020 IX International Congress of Mechatronics Engineering and Automation (CIEMA)*. IEEE, 2020. p. 1-6.
- [22] Leonardo Pedroso, Pedro Batista (2022). "Reproducible low-cost flexible quadruple-tank process experimental setup for control educators, practitioners, and researchers". *Journal of Process Control*, 118, 82-94.
- [23] CHUNG, Serena H.; BRAATZ, Richard D. Teaching antiwindup, bumpless transfer, and split-range control. *Chemical Engineering Education*, v. 32, n. 3, p. 220-223, 1998.
- [24] Hägglund, T. "A feedforward approach to mid-ranging control." *Control Engineering Practice* 108 (2021): 104713.
- [25] Alsop, Nicholas. "Implementing mid-ranging in a DCS environment." *IFAC-PapersOnLine* 49.7 (2016): 550-555.
- [26] Reyes-Lúa, A., Zotică, C., Forsman, K., and Skogestad, S. (2019). Systematic design of split range controllers. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 898–903.
- [27] Allison, B. J., & Ogawa, S. (2003). Design and tuning of valve position controllers with industrial applications. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 25(1), 3-16.
- [28] Reyes Lúa, Adriana and Skogestad, Sigurd. Multi-input single-output control for extending the operating range: Generalized split range control using the baton strategy. *Journal of Process Control*, 91, 1-11, (2020).
- [29] Alsop, Nicholas (2016). Implementing mid-ranging in a DCS environment. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 550-555
- [30] Shinskey, F. Greg. *Controlling multivariable processes*. ISA, 1981.
- [31] Reyes-Lúa, Adriana, Cristina Zotică, and Sigurd Skogestad. "Optimal operation with changing active constraint regions using classical advanced control." *IFAC-PapersOnLine* 51.18 (2018): 440-445.
- [32] Reyes-Lúa, A. and Skogestad, S. (2020). Multi-input single-output control for extending the operating range: Generalized split range control using the baton strategy. *Journal of Process Control*, 91, 1–11.
- [33] Coelho, Antonio Augusto Rodrigues, and Leandro dos Santos Coelho. *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. 2004.
- [34] Astrom, K. J. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning*. The International Society of Measurement and Control.
- [35] Fatani, S. T., Patwardhan, R. S., & Andreu, M. A. L. (2017, May). A novel single-input two-output (SITO) strategy for split range control. In *2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)* (pp. 348-353). IEEE.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Souza, Lucas Tavares Viana de.

Uma bancada didática de baixo custo para ensino de controle mid-ranging
/ Lucas Tavares Viana de Souza, Luiz Medeiros Barros, Porto Velho-RO,
2023.

6 f. : il.

Orientador(a): Prof. Me. José Diogo Forte de Oliveira Luna.

Coorientador(a): Prof. Me. Kariston Dias Alves.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de
Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Rondônia - IFRO, Porto Velho-RO, 2023.

1. mid-ranging. 2. Sistemas TISO. 3. Bancada didática. 4. controle
automático. I. Barros, Luiz Medeiros. II. Luna, José Diogo Forte de Oliveira
(orient.). III. Alves, Kariston Dias (coorient.). IV. Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. V. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Evandro Silva de Sousa, CRB-11-956 (Campus Porto Velho Calama)