

PROPOSTA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA HIDRÁULICA DE VÁLVULAS

José Eduardo Vaccari Bresciani¹, Gabriel Felipe Domingues Pereira², Monica Ronobo Coutinho³, Wagner André dos Santos Conceição⁴, Cássio Rodolfo Aveiro da Silva⁵

¹Universidade Estadual de Maringá -PEM, Maringá, Brasil (pg407235@uem.br)

²Universidade Estadual de Maringá -PEM, Maringá, Brasil (pg406940@uem.br)

³Universidade Estadual de Maringá -PEM, Maringá, Brasil (mrcoutinho@uem.br)

⁴Universidade Estadual de Maringá -PEM, Maringá, Brasil (wasconceicao@uem.br)

⁵Universidade Estadual de Maringá -PEM, Maringá, Brasil (craveiro@uem.br)

Resumo: A modelagem de tanques em livros-texto de controle trata a resistência hidráulica de válvulas como parâmetro conhecido, sem apresentar metodologia para sua determinação. Este trabalho propõe um sistema de baixo custo com Arduino, sensor ultrassônico e infravermelho para monitorar o nível de líquido em tanque cilíndrico durante esvaziamento, permitindo determinar a resistência hidráulica. O sensor ultrassônico apresentou maior repetibilidade e a resistência média obtida foi $1,651 \times 10^{-5}$ s/m^{0.5}.

Palavras-chave: Resistência hidráulica; Arduino; Sensores; Controle.

INTRODUÇÃO

A modelagem matemática de sistemas dinâmicos dentro das engenharias é um pilar fundamental para projetos de malhas fechadas de controle. A modelagem dinâmica de tanques constitui o ponto de partida para o aprendizado, pois frequentemente são representados como sistemas de primeira ordem. Seja em arranjos em cascata ou em série, sua dinâmica é ditada pelo princípio da conservação de massa, que estabelece a relação entre as vazões de entrada e saída e consequentemente o nível de líquido dentro do tanque.

Em obras clássicas como Engenharia de Controle Moderno de Ogata (2010) e Análise e Controle de Processos de Coughanowr (1987) os autores dedicam muitos exemplos a essa classe de sistemas, utilizando-os para demonstrar como sair do balanço de massa e chegar a função transferência, a linearização de componentes não lineares do balanço massa e o projeto de controladores. Em todos esses desenvolvimentos, um parâmetro físico aparece como elemento central que é a resistência hidráulica da válvula da saída.

Coughanowr e Ogata definem a resistência hidráulica da válvula como uma relação entre a vazão de saída da válvula e o nível de líquido do tanque. Inicialmente ambos os autores primeiro apresentam uma relação linear entre a vazão e o nível de líquido do tanque ($q = h/R$). Em uma segunda abordagem, eles consideram uma relação não linear entre a vazão

e o nível de líquido ($q = R\sqrt{h}$), essa relação é predominante em aplicações industriais.

Contudo, há uma lacuna nos livros textos de controle que a ausência de uma metodologia prática para determinar o valor numérico da resistência hidráulica da válvula. Os livros apresentam a resistência como um parâmetro “conhecido” o que leva o leitor a supor que a resistência é um dado prontamente disponível. Na realidade a resistência da válvula não é um parâmetro estático ou trivial que vem estampado na própria válvula, assim sendo necessário estabelecer meios práticos para se determinar a resistência de válvulas.

Muitos estudos recentes têm se utilizado de ferramentas de baixo custo e prototipagem rápida, com destaque para o Arduino pois vem possibilitando a sua aplicação dentro de diferentes campos da engenharia. Trabalhos como Serrano et al. (2020) e Maranni et al. (2021) utilizaram sensores ultrassônicos (HC-SR04) ligados ao Arduino para acompanhar o nível de líquido dentro de um tanque para determinar o coeficiente de descarga. Já Barros e Rosa (2018) utilizaram sensores de pressão diferencial (MPX5050) integrados ao Arduino na determinação do coeficiente de descarga de um tubo de venturi alcançando erro inferior a 5% em relação aos procedimentos tradicionais. Especificamente na área de controle Santos et al. (2025) apresenta curva experimental entre nível de líquido e vazão obtendo a resistência hidráulica da válvula da saída.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de baixo custo com a utilização do Arduino, empregando sensor ultrassônico e infravermelho para monitorar o nível de líquido dentro de um tanque, permitindo a determinação experimental da resistência hidráulica da válvula de saída a partir da curva do nível de líquido versus tempo, assim cobrindo uma lacuna dos livros de controle de processo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considere o tanque cilíndrico apresentado na Figura 1, tendo área de secção transversal constante (A). O tanque apresenta apenas uma saída.

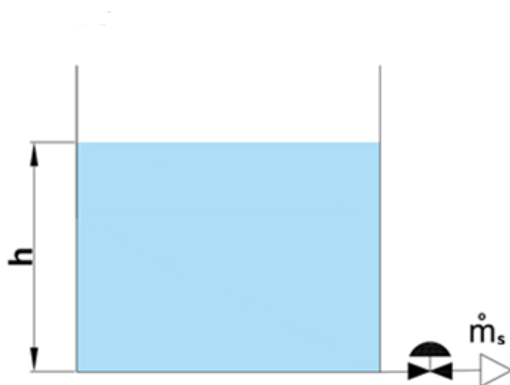


Figura 1. Sistema de Nível de Líquido.

Fonte: Autores

Fazendo o balanço de massa do sistema:

$$-\dot{m}_s = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

Em que: $\dot{m}_s$ é a vazão mássica de saída do tanque [M/t].

Sabe-se que a massa específica (ρ) ser obtida por $\rho = \frac{m}{V}$ ou $\rho = \frac{\dot{m}}{f}$. Desta forma, podemos reescrever a Equação 2 do seguinte modo:

$$-\rho f = \frac{d(\rho V)}{dt} \quad (2)$$

Sendo f a vazão volumétrica de saída do tanque.

Assumindo que ρ é constante, pois a massa específica de líquidos varia muito pouco dentro de um intervalo de temperatura, tem-se:

$$-\rho f = \frac{\rho dV}{dt} \quad (2)$$

$$-f = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

O volume de um cilíndrico, é dado por $V=A.h$, então:

$$-f = \frac{d(Ah)}{dt} \quad (4)$$

Sabe-se que a área é constante, então:

$$-f = \frac{A dh}{dt} \quad (5)$$

A vazão volumétrica de saída é dada por uma relação não linear entre o nível de líquido dentro do tanque e a resistência da válvula, $f = R\sqrt{h}$, logo a equação 5 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$-R\sqrt{h} = \frac{A dh}{dt} \quad (6)$$

Rearranjando a equação 6, temos:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{R}{A}\sqrt{h} \quad (7)$$

Sendo a equação 7, a equação diferencial que descreve o processo apresentado na Figura 1.

A vazão volumétrica de saída apresenta um comportamento não linear com o nível de líquido dentro do tanque. A vazão volumétrica de saída é dada pela Equação 1.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção detalha a metodologia experimental desenvolvida para determinar a resistência hidráulica de uma válvula em um sistema dinâmico de nível de líquido dentro do tanque. O procedimento abrange a montagem do tanque, a calibração dos sensores e o processamento dos dados experimentais para a determinação da resistência hidráulica da válvula.

Materiais

O módulo experimental montado para esse trabalho é apresentado na Figura 2, para isso foram utilizados os seguintes materiais:

- tubo de acrílico;
- suporte inferior;
- suporte superior;
- conexão pneumática engate rápido reta;
- tubos de PU (poliuretano);
- válvula de bloqueio de fluxo;
- Arduino Uno;
- sensor infravermelho;
- sensor ultrassônico;
- régua graduada.

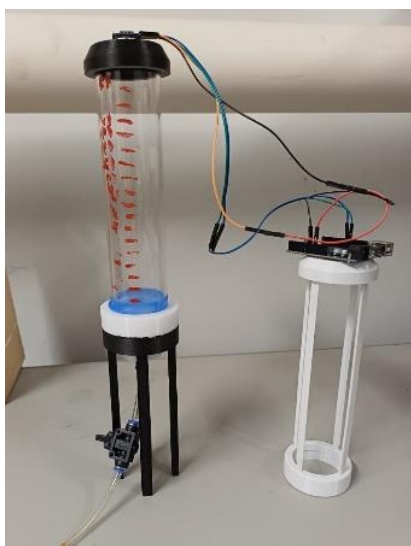


Figura 2. Plataforma experimental.

Fonte: Autores

O tanque foi fabricado com um tubo de acrílico transparente de 50 mm de diâmetro externo, 2 mm de espessura e 200 mm de comprimento. Para o acoplamento na parte inferior do tanque e a conexão com a válvula, a Peça 1 (representada na Figura 2) foi projetada no software Solidworks e feita em impressão 3D em PETG. Foi necessário utilizar fita veda rosca para evitar o vazamento de água nas conexões. Na parte superior do tubo, a Peça 2, de suporte dos sensores, foi impressa 3D da mesma forma, com adaptadores para cada tipo de sensor, conforme a Figura 3. Foi necessário fazer uma extensão do encaixe dos sensores, para que a distância deles e da superfície da água fosse aumentada, possibilitando leituras mais precisas de distância.

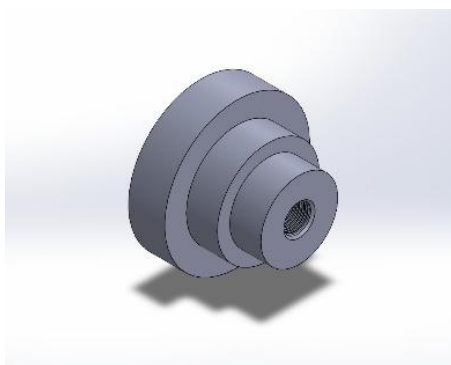


Figura 2. Peça 1: Suporte inferior.

Fonte: Autores

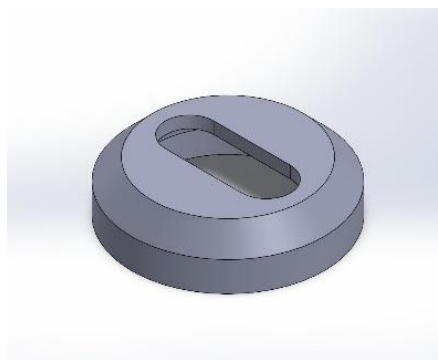


Figura 3. Peça 2: Suporte superior.

Fonte: Autores

Para a conexão com a válvula, uma conexão reta de engate rápido foi rosqueada na parte de baixo da peça 1. Utilizaram-se tubos de PU (poliuretano) transparentes de 4 mm. Uma válvula pneumática de bloqueio de fluxo manual foi testada, representada na Figura 4.



Figura 4. Válvula testadas.

Fonte: Autores

O sistema utilizado para a medição da distância foi programado em um microcontrolador Arduino Uno, ocorrendo a transmissão de dados pela porta serial conectada a um computador. O primeiro sensor utilizado foi o Sharp 2YA21 F 17, um detector de distância infravermelho de saída analógica, alimentado por 5V, capaz de medir proximidades entre 10 e 80 cm e precisão aproximada de +/- 1 cm. O segundo foi o HC-SR04, um detector de distância ultrassônico de interface digital (*Trigger/Echo*), alimentado por 5V, capaz de medir proximidades entre 2 cm e 4 metros, com uma precisão de cerca de 3 mm. Os sensores, mostrados na Figura 5, foram utilizados alternadamente, sendo substituídos na parte superior do tanque para cada experimento.

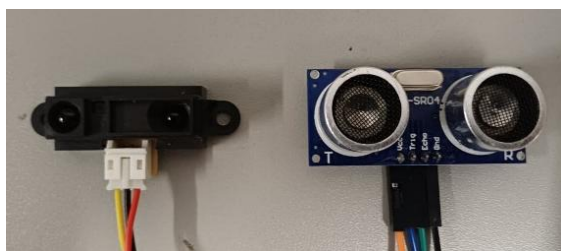


Figura 5. Sensor Sharp 2YA21 F 17 e sensor HC-SR04

Fonte: Autores

O Quadro 1 apresenta o levantamento dos custos estimados para a aquisição e prototipagem dos componentes do módulo experimental.

Item	Quantidade	Custo [R\$]
Arduino Uno	1	35,00
Conexão Pneumática Engate Rápido Reta	1	7,00
PETG para impressão 3D	200 g	20,00
Sensor infravermelho	1	43,00
Sensor ultrassônico	1	10,00
Tubo de acrílico	1	100,00
Tubo de PU	1	12,00
Válvula de bloqueio manual	1	7,00
Total	—	234

Quadro 1. Levantamento dos custos de materiais

Métodos

Montagem do Módulo Experimental

O tanque foi montado com o tubo de acrílico acoplado a peça 1 (Suporte inferior), conectada a válvula de saída. A peça 2 (Suporte superior) foi acoplado a parte superior do tubo de acrílico, permitindo a fixação alternada dos sensores infravermelho e ultrassônico, todas as conexões rosqueadas foram vedadas com fita veda rosca.

A Figura 6 representa a vista explodida correspondente à montagem da plataforma experimental.

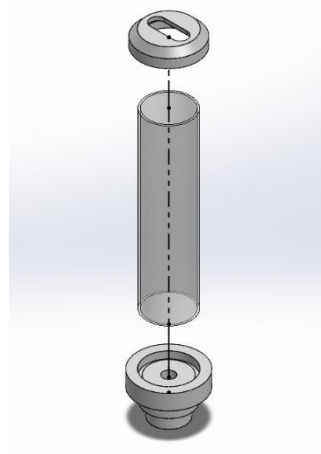


Figura 6. Vista explodida da plataforma experimental

Calibração dos Sensores

A calibração dos sensores foi realizada diretamente no sistema experimental, utilizando a superfície livre da água como alvo de medição. O objetivo foi estabelecer a relação entre o sinal fornecido pelos sensores e o nível real de água no tanque. Durante a calibração e as medições, respeitou-se o intervalo de distância medido pelos sensores, ambos sendo posicionados a aproximadamente 10 cm da superfície da água no nível máximo.

O nível de referência foi obtido por meio de uma régua graduada posicionada junto ao reservatório. Em cada condição de enchimento, foi registrada a altura da coluna de água medida a partir do fundo do tanque. Simultaneamente, foram adquiridos os sinais correspondentes dos sensores conectados a um microcontrolador Arduino.

Para o sensor infravermelho Sharp 2YA21 F 17, foram coletados pares de dados compostos pelo valor da leitura analógica do conversor A/D do Arduino e pelo nível real da água medido pela régua. A análise dos dados experimentais indicou uma relação aproximadamente linear entre as variáveis dentro da faixa de operação utilizada. A partir da regressão linear dos dados obtidos, foi determinada a equação de calibração

$$h = 0,076 * L - 14,9 \quad (8)$$

em que (h) representa o nível de água em centímetros e (L) corresponde à leitura analógica fornecida pelo Arduino. Essa equação foi posteriormente incorporada ao programa de aquisição de dados para converter automaticamente as leituras do sensor em valores de nível.

Além da leitura analógica, o sistema registrou a tensão correspondente ao sinal do sensor, calculada a partir da conversão da leitura digital considerando

uma tensão de referência de 5 V e resolução de 10 bits.

Para o sensor ultrassônico HC-SR04, a calibração foi realizada por meio de uma relação geométrica direta. Inicialmente foi determinada a distância vertical entre o sensor e o fundo do tanque, definida como (H). Durante a operação, o sensor mede a distância (d) entre o transdutor e a superfície da água utilizando o princípio do tempo de voo de ondas ultrassônicas. O nível de água foi então calculado por

$$h = H - d \quad (9)$$

onde (h) é o nível da água medido a partir do fundo do tanque. No sistema desenvolvido, o valor de (H) foi determinado experimentalmente como 29,3 cm.

As leituras de ambos os sensores foram realizadas a intervalos de 5 s e transmitidas ao computador por comunicação serial. Os dados obtidos foram armazenados em planilhas eletrônicas e utilizados para a avaliação do desempenho dos sensores e comparação entre as tecnologias de medição empregadas.

Ensaio Experimental

Após a calibração e validação dos sensores, foram realizados ensaios de esvaziamento do tanque para determinação da resistência hidráulica da válvula. Em cada ensaio, o reservatório era preenchido até a marcação do nível de 17 cm e, em seguida, a válvula era aberta completamente, iniciando-se simultaneamente a aquisição automática dos dados de nível e tempo por meio do Arduino. Além disso, para evitar erros de medição da distância, foi colocado um disco impresso 3D na superfície da água, flutuando na superfície da água para melhorar a leitura.

Foram avaliadas duas configurações de aquisição de dados, utilizando intervalos de amostragem de 2 s e 5 s entre leituras consecutivas. Para cada instante de tempo, registrou-se a distância entre o sensor e a superfície da água, a partir da qual foi calculado o nível da coluna líquida no tanque.

Os dados coletados foram transmitidos ao computador via comunicação serial e processados em ambiente Python. Inicialmente, os registros foram organizados em planilhas contendo o tempo de aquisição, a distância medida pelo sensor e o nível de água correspondente. Durante a análise dos resultados, observou-se a ocorrência de valores discrepantes, decorrentes de perturbações nas medições dos sensores, principalmente associadas a oscilações da superfície da água e ruídos de aquisição. Esses pontos foram identificados por

inspeção dos dados experimentais e removidos antes da etapa de ajuste dos modelos.

Determinação da Resistência da Válvula

Para a determinação da resistência hidráulica, o processamento computacional baseou-se na solução analítica da equação diferencial que governa o esvaziamento do tanque. Partindo da Equação 7, a separação de variáveis e a integração de ambos os lados conduzem a:

$$2\sqrt{h} = -\frac{R}{A} t + C \quad (10)$$

onde C é a constante de integração. Reorganizando a Equação 10, obtém-se:

$$\sqrt{h} = -\frac{R}{2A} t + \frac{C}{2} \quad (11)$$

A Equação 11 evidencia que a raiz quadrada do nível, $\sqrt{h}$, é uma função linear do tempo. Definindo $\alpha = -R/(2A)$ como coeficiente angular e $\beta = C/2$ como coeficiente linear, a expressão assume a forma canônica de uma regressão linear:

$$\sqrt{h} = \alpha t + \beta \quad (12)$$

A partir dos dados experimentais de nível e tempo, calculou-se $\sqrt{h_i}$ para cada instante t_i . Em seguida, aplicou-se a regressão linear pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) ao conjunto de pares $(t_i, \sqrt{h_i})$, minimizando a soma dos quadrados dos resíduos:

$$\min_{\alpha, \beta} \sum_{i=1}^n (\sqrt{h_i} - \alpha t_i - \beta)^2 \quad (13)$$

O ajuste foi implementado computacionalmente por meio da função *numpy.polyfit* da linguagem Python, que resolve o problema de MQO via decomposição QR. A resistência hidráulica foi então calculada diretamente a partir do coeficiente angular obtido pelo ajuste:

$$R = -2A \alpha \quad (14)$$

A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação R^2 , definido como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{h_i} - \widehat{\sqrt{h_i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{h_i} - \bar{\sqrt{h}})^2} \quad (15)$$

onde $\widehat{\sqrt{h_i}} = \alpha t_i + \beta$ são os valores preditos pelo modelo ajustado e $\bar{\sqrt{h}}$ é a média amostral de $\sqrt{h_i}$. Os resultados numéricos obtidos, incluindo os coeficientes do ajuste, o valor de R^2 e a resistência

hidráulica calculada, foram exportados para uma planilha eletrônica no formato .xlsx, gerada automaticamente pelo código em Python ao final do processamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam os gráficos de h em função de t para os quatro ensaios, juntamente com as retas de ajuste. Observa-se que o modelo linear descreve satisfatoriamente o comportamento experimental em todos os casos, com coeficientes de determinação R^2 variando entre 0,955 e 0,977.

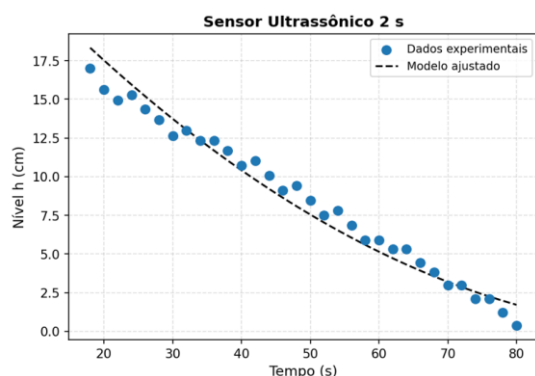


Figura 7. Ensaio com sensor ultrassônico e período de aquisição de dados de 2 s.

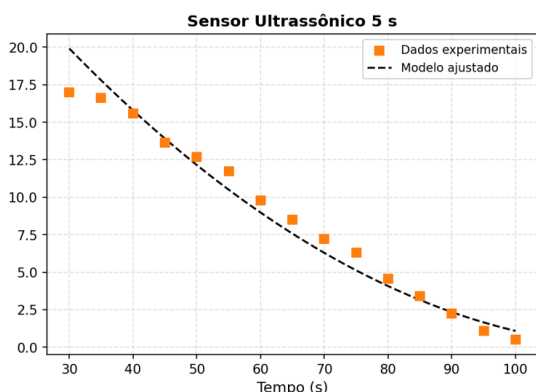


Figura 8. Ensaio com sensor ultrassônico e período de aquisição de dados de 5 s.

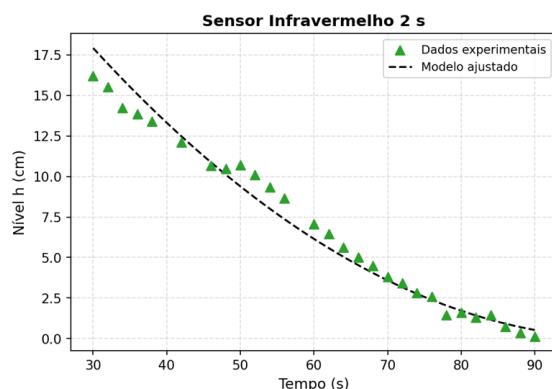


Figura 9. Ensaio com sensor infravermelho e período de aquisição de dados de 2 s.

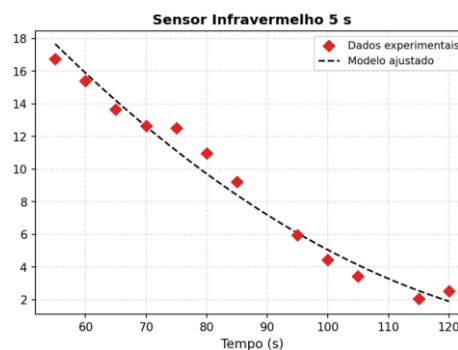


Figura 10. Ensaio com sensor infravermelho e período de aquisição de dados de 5 s.

A Tabela 1 reúne o coeficiente de determinação R^2 , a resistência hidráulica calculada pela Equação 14 e sua incerteza expandida ($k = 2$, nível de confiança de 95%).

Tabela 1. Parâmetros do ajuste linear e resistência hidráulica calculada.

Ensaio	R^2	$R (\times 10^{-5} \text{ s/m}^{0,5})$
Ultrassônico 2 s	0,955	1,594
Ultrassônico 5 s	0,970	1,624
Infravermelho 2 s	0,977	1,943
Infravermelho 5 s	0,976	1,444
Média $\pm$ DP	—	1,651 $\pm$ 0,182

A Figura 10 apresenta os valores de R obtidos em cada ensaio com as respectivas barras de incerteza expandida ($k = 1$). A dispersão entre os quatro ensaios resulta em uma variação relativa máxima de 30,2% entre o maior (infravermelho 2 s: $R = 1,943 \times 10^{-5} \text{ s/m}^{0,5}$) e o menor (infravermelho 5 s: $R = 1,444 \times 10^{-5} \text{ s/m}^{0,5}$) valor obtido.

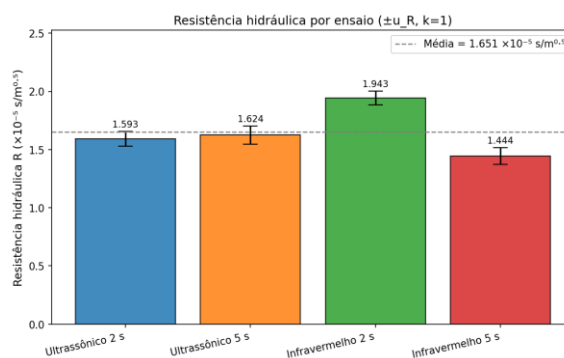


Figura 10. Título da figura.

Os dois ensaios com o sensor ultrassônico (HC-SR04) apresentaram concordância entre si, com valores de R de $1,594 \times 10^{-5} \text{ s/m}^{0,5}$ e $1,624 \times 10^{-5} \text{ s/m}^{0,5}$ para os intervalos de 2 s e 5 s, respectivamente — uma diferença de apenas 1,9%. Isso indica que, para esse sensor, o intervalo de



amostragem não influenciou significativamente o resultado, o que é consistente com a menor suscetibilidade do HC-SR04 a ruídos de superfície.

Os ensaios com o sensor infravermelho (Sharp 2YA21 F 17) apresentaram maior discrepância entre si (25,8%), o que pode ser atribuído à maior sensibilidade desse sensor a variações na refletividade da superfície da água e às oscilações do menisco durante o esvaziamento, efeitos que se manifestam de forma distinta conforme o intervalo de amostragem adotado. O ensaio com intervalo de 2 s capturou mais pontos na região de nível mais alto, onde as oscilações superficiais são mais pronunciadas, enquanto o intervalo de 5 s reduziu a quantidade de pontos nessa faixa.

Apesar da dispersão, os quatro valores obtidos de R^2 situam-se na mesma ordem de grandeza, e a média obtida pode ser tomada como uma estimativa representativa da resistência hidráulica da válvula nas condições testadas. Os elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,95$) confirmam que o modelo dinâmico de primeira ordem com resistência hidráulica não linear é adequado para descrever o esvaziamento do tanque.

CONCLUSÃO

O presente trabalho desenvolveu e validou um módulo experimental de baixo custo, baseado no Arduino e sensores de distância, para a determinação da resistência hidráulica de uma válvula. A metodologia proposta baseada na regressão linear da raiz quadrada do nível de líquido em função do tempo, mostrou-se eficaz para estimar a resistência hidráulica a partir dos dados experimentais.

A comparação entre os sensores demonstrou que o sensor ultrassônico apresentou maior robustez e repetibilidade, sendo menos afetado por oscilações da superfície da água e pela taxa de amostragem do que o sensor infravermelho.

A comparação entre as taxas de aquisição de 2s e 5s demonstrou que o sensor ultrassônico mantém a consistência dos resultados independente do intervalo de amostragem, enquanto o sensor infravermelho apresenta maior sensibilidade a frequência de amostragem devido a sua susceptibilidade as oscilações superficiais da água. Assim permitindo definir a taxa mínima de aquisição de dados necessária para garantir a precisão do método.

Portanto, a metodologia proposta é capaz de suprir a lacuna identificada na literatura quanto a ausência de métodos práticos para a obtenção experimental da resistência hidráulica de válvulas.

Então com base o que foi exposto, que o módulo experimental desenvolvido é viável, de baixo custo e reprodutível, permitindo a determinação

experimental da resistência da válvula sem necessidade de equipamentos sofisticados. Trabalhos futuros podem explorar a aplicação da mesma metodologia para diferentes geometrias de tanques, tipos de válvulas e fluidos, bem como utilizar os dados de resistência de válvulas em projetos de controladores em malha fechada.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Capes.

REFERÊNCIAS

- Barros, G. G., Rosa, H. M. P. Determinação e análise de coeficiente de descarga de um tubo de Venturi com auxílio de um sensor de diferença de pressão MPX 5050. *The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC*, v. 4, n. 2, p. 225-228, 2018.
- Coughanowr, D. R.; Koppel, L. B. *Análise e controle de processos*. Guanabara, Rio de Janeiro, 1987.
- Ogata, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.
- Maranni, A. C.; Lima, R. R.; Calheiro, L. B.; Gonçalves, A. M. B. Exploring Torricelli's theorem with Arduino. *Journal of Experimental and Techniques Instrumentation - JETI*, v.4, n.4, p. 22-28, 2021.
- Santos, M. H. C.; Torres, A. S.; Torres, M. M. Sistema de Controle de Nível de Tanque via Arduino. *Mecânica Clássica e Moderna: Um Panorama Interdisciplinar*, v.1, p. 1-27, 2025.
- Serrano, M. del C. C.; Oliver, E. B. V., Díaz; S. M. A., González, A. L. L.; Zavala, S. A. A. Vaciado de tanque ortoédrico por efecto de la gravedad, con el apoyo de Arduino y su simulación con Geogebra. *Pistas Educativas*, v. 42, n. 137, p. 776-794, 2020.