



CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS

CONSTRUCTION OF A DIDACTIC BENCH FOR THE PARALLEL AND SERIES PUMP CONFIGURATION STUDY

Johann Maurer Sant'ana¹, Ana Carolina Coelho de Matos², Christopher Freire³, João Luiz Martins Mattoso Câmara⁴, Jhonny Huertas⁵

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p653-669.2026

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo a construção e a validação de uma bancada didática para o estudo da associação de bombas em série e em paralelo. O princípio para a construção da bancada foi a adaptabilidade do encanamento, por meio de válvulas de esfera, que permitiram alterar a circulação do fluido de trabalho para operar em ambas as configurações. A bancada foi construída com base em quatro componentes básicos: um reservatório, duas bombas centrífugas, um sistema de encanamento e instrumentos de medição de vazão e pressão. As curvas características, em associação em série e em paralelo, foram coerentes com o esperado teoricamente, sendo validadas por meio da comparação entre as equações das curvas experimentais e as teóricas. Foi confirmado que bombas associadas em série favorecem o aumento da energia ou da altura manométrica, enquanto a associação em paralelo favorece o aumento da vazão.

PALAVRAS-CHAVE: bancada didática; associação de bombas; curvas características.

ABSTRACT: This work aimed to construct and validate a didactic test bench for studying the association of pumps in series and in parallel. The principle for constructing the test setup was the adaptability of the piping, via ball valves, to change the working fluid's circulation and operate in both configurations. The test bench was built around four components: a reservoir, two centrifugal pumps, a piping system, and flow and pressure measuring instruments. The characteristic curves, in series and parallel configurations, were consistent with theoretical expectations, validated by comparing the experimental curves' equations with the theoretical ones. It was confirmed that pumps connected in series increase energy or manometric head, while parallel association increases flow rate.

KEYWORDS: didactic bench; series and parallel pump configurations; characteristics curves.

¹ Engenheiro Mecânico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, *campus* Nova Friburgo, johann_Maurer@hotmail.com

² Engenheira Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, *campus* Nova Friburgo, accoelhomatos@gmail.com

³ Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, *campus* Nova Friburgo, chrisfreire2001@gmail.com

⁴ M.Sc. em Ciências e Tecnologia dos Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, *campus* Nova Friburgo, jlmartins97@gmail.com

⁵ Professor do Departamento de Engenharia Mecânica e Energia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, *campus* Nova Friburgo, jhonnyhf@iprj.uerj.br



INTRODUÇÃO

A utilização de bombas, uma categoria de máquinas de fluxo, é fundamental em diversos setores da sociedade, como no transporte e na distribuição de água potável (elemento fundamental para a vida), no escoamento de águas residuais, na indústria alimentícia e, inclusive, na indústria do petróleo (Alé, 2011). Desde a Antiguidade, as bombas eram utilizadas na agricultura e, após a Revolução Industrial, passaram a ser empregadas no transporte de matérias-primas e produtos industrializados. Nesse contexto, é de grande importância compreender o deslocamento de fluidos por meio de bombas hidráulicas e identificar suas características mais relevantes (Macintyre, 1997; Mattos e Falco, 1998).

Entre as máquinas de fluxo, as bombas centrífugas são amplamente utilizadas na indústria de processos químicos. Apresentam capacidade de 0,5 m³/h a 20.000 m³/h e trabalham com alturas manométricas entre 1,5 e 5.000 mca (metros de coluna de água). Elas caracterizam-se também pela ausência de pulsação em serviço contínuo e apresentam um rotor com pás, montado em um eixo, que gira no interior da carcaça. O fluido alcança o centro do rotor por meio de uma boca de aspiração, sendo forçado pelas pás do rotor em direção à periferia, onde atinge uma velocidade elevada. Ao sair das extremidades das pás, o líquido passa para a voluta, na qual ocorre a transformação da energia cinética em energia de pressão (Alé, 2011).

Por outro lado, o entendimento da transformação da energia mecânica em energia hidráulica por meio das bombas tem como aspecto complementar a análise da associação de bombas, tanto em série quanto em paralelo. Esse aspecto envolve a compreensão das vantagens e desvantagens de associar bombas, assim como das considerações que devem ser feitas para decidir quando se torna relevante associar bombas centrífugas (Bonumá, 2016; Dos Santos *et al.*, 2020; Oliveira, 2017; Sant'ana, 2019). Além disso, as perdas de energia decorrentes do atrito e das conexões são também relevantes, pois influenciam a potência das bombas utilizadas. Dessa forma, o dimensionamento inadequado e a associação incorreta podem resultar em projetos ineficientes, pouco confiáveis e, principalmente, antieconômicos. Outro aspecto a mencionar é a possibilidade de realizar a manutenção das bombas sem interromper o escoamento. Assim, a associação de bombas em paralelo pode desempenhar um papel predominante.

A importância de o engenheiro estudar e entender os sistemas de bombeamento com maior propriedade está relacionada à necessidade que a sociedade humana sempre possuiu pela necessidade histórica da sociedade de



transportar e distribuir água. Os alunos dos cursos de Engenharia precisam ter a oportunidade de estudar, durante sua graduação, sistemas que envolvem o deslocamento de fluidos, pois estes são muito importantes e estão presentes em diversos setores da indústria. Dessa forma, analisar e interpretar as informações obtidas por meio de uma curva característica de uma bomba centrífuga torna-se necessário para a formação do engenheiro (Nicoli *et al.*, 2004).

Este trabalho teve como objetivo construir e validar uma bancada hidráulica didática para o estudo da associação de bombas. A bancada foi construída com duas bombas centrífugas, usando um arranjo experimental que permite adaptar o sistema ao funcionamento em série e em paralelo, bem como ao funcionamento com as bombas operando individualmente. A partir do sistema montado, foram coletados dados experimentais para construir curvas características de vazão *versus* altura manométrica, com as bombas operando tanto individualmente quanto em associação. A implementação desse sistema busca contribuir para o processo de formação acadêmica dos alunos do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico da UERJ.

METODOLOGIA

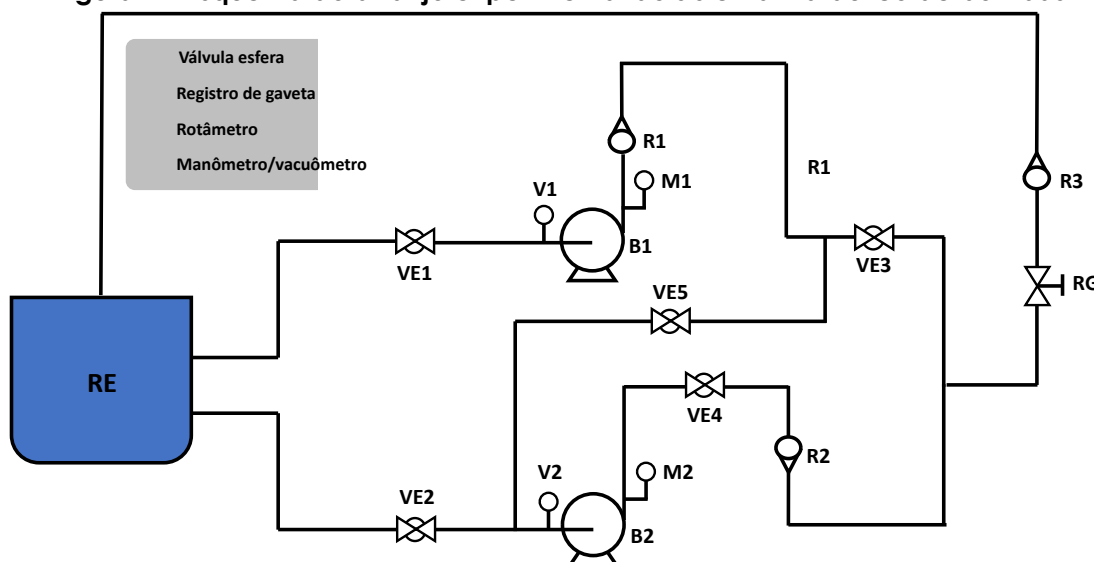
A construção da bancada hidráulica para o estudo da associação de bombas foi realizada em três etapas: i) definição do arranjo experimental, direcionada à configuração das bombas, do sistema de encanamento e da instrumentação da bancada; ii) construção da bancada, que consistiu na definição dos componentes da bancada, na aquisição do material e na montagem do sistema hidráulico; e iii) realização de testes experimentais, para a validação da consistência do sistema e o estudo da associação das bombas em série e em paralelo.

A bancada foi concebida como um sistema em circuito fechado, formado por um reservatório do qual o fluido de trabalho era succionado, passando, em seguida, pelo sistema de tubulação até retornar ao mesmo reservatório. O projeto da bancada baseou-se no arranjo experimental da tubulação e no conjunto de válvulas de esfera que permitiram adaptar o sistema para trabalhar em duas configurações, uma com as bombas associadas em série e outra em paralelo. Os testes experimentais foram realizados com água como fluido de trabalho, à temperatura ambiente. Nos testes, foram registrados dados de pressão e vazão para o levantamento das curvas características de altura manométrica (H) em função da vazão (Q).

Definição do arranjo experimental

A Figura 1 apresenta o arranjo experimental do sistema hidráulico. A representação ilustra as linhas de fluxo correspondentes ao encanamento, bem como as posições das válvulas que permitem ao sistema operar com as bombas associadas em série ou em paralelo. O sistema é composto por duas bombas, cada uma conectada a um reservatório por meio de tubulações. O arranjo experimental também apresenta a instrumentação instalada para o registro da pressão e da vazão.

Figura 1 – Esquema do arranjo experimental do sistema hidráulico de bombas



Fonte: elaborada pelos autores.

O arranjo experimental do sistema apresenta cinco válvulas de esfera (VE), um registro de gaveta (RG), três rotâmetros (R), dois manômetros (M) e dois vacuômetros (V). Cada válvula de esfera tem uma função específica no sistema, com configurações distintas de abertura e fechamento. As válvulas de esfera têm como função permitir ou interromper completamente o escoamento do fluido em uma parte específica do encanamento, definindo, assim, a configuração da associação das bombas. O registro de gaveta permite ajustar a vazão por meio da abertura parcial. Assim, o RG foi instalado para controlar a vazão da água, com as bombas operando em série ou em paralelo.

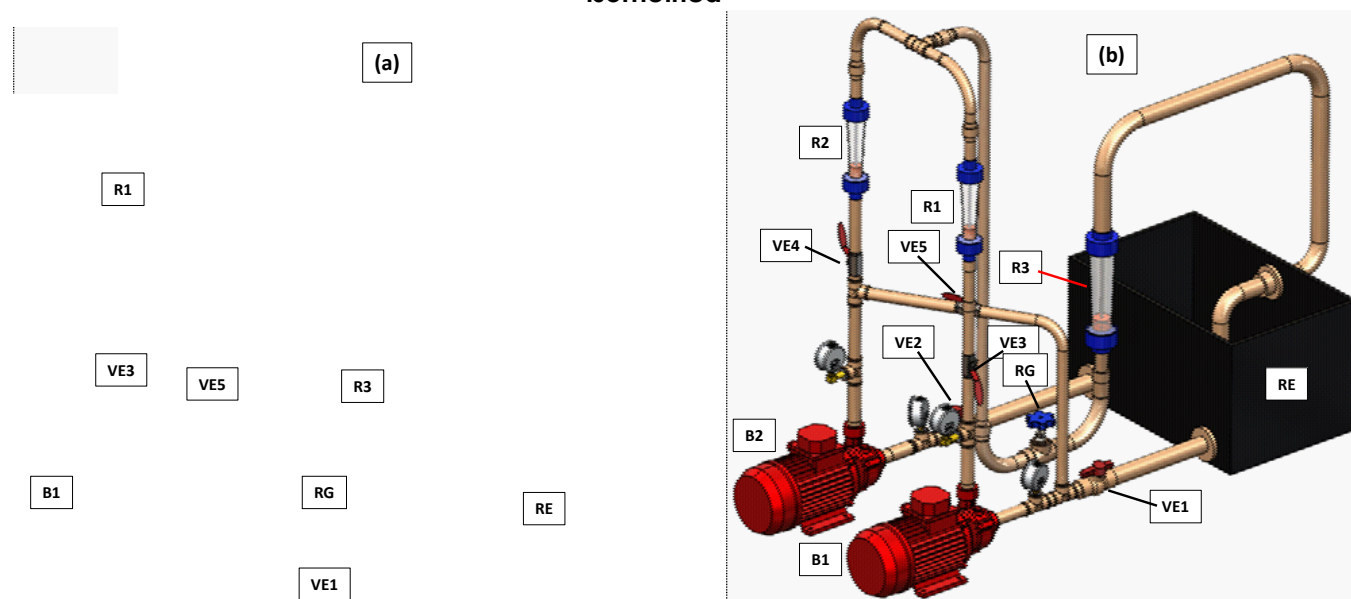
Construção da bancada

A etapa de construção da bancada teve início com a elaboração do desenho em software CAD 3D, utilizando-se o SolidWorks. Com base no arranjo experimental do sistema hidráulico apresentado na Figura 1, foi desenhada a estrutura do sistema hidráulico, considerando-se a configuração do sistema de encanamento (Figura 2). Nesse desenho, podem-se observar todos os elementos constitutivos que a bancada deve conter. Para a construção da bancada, definiram-se três conjuntos de materiais: (i) tubulações e acessórios; (ii) instrumentação; e (iii) reservatório, bombas e estrutura de suporte da bancada.

Tubulações e acessórios

A parte de encanamento foi construída utilizando os seguintes componentes: tubos de PVC de $\frac{3}{4}$ e 1 polegada; 2 joelhos de 90° ; 10 curvas de 90° ; 5 válvulas de esfera de $\frac{3}{4}$ de polegada; 1 registro de gaveta de 1 polegada; 3 têes soldáveis; 4 têes de transição; 1 adaptador soldável com anel para caixa d'água de 2 polegadas; 6 uniões soldáveis; 18 adaptadores soldáveis curtos com bolsa e rosca para registro; 14 luvas de transição; 1 bucha de redução de $1\frac{1}{4}$ para 1 polegada; 1 bucha de redução de 1 para $\frac{3}{4}$ de polegada; e 1 conector macho.

Figura 2 – Desenhos da bancada experimental feitos no SolidWorks: (a) vista lateral e (b) vista isométrica



Fonte: elaborada pelos autores.



Instrumentação

Os instrumentos utilizados foram: 2 rotâmetros LZS-25 D (faixa de vazão de 300 a 3.000 L/h), 1 rotâmetro LZS-32 D (faixa de vazão de 600 a 6.000 L/h), 2 manômetros de fole (faixa de pressão de 0 a 80 psi, com escala de 1 psi) e 2 vacuômetros (faixa de pressão de -10 a 0 inHg, com escala de 0,5 inHg).

Reservatório, bombas e estrutura de suporte da bancada

A bancada foi construída com os seguintes componentes adicionais: 1 reservatório de polipropileno com capacidade de 45 L e dimensões de 30 × 30 × 50 cm; 2 bombas centrífugas (marca Thebe, modelo TP-60, rotação de 3.450 rpm e potência de 0,5 HP); 1 base de suporte em MDF, com 1,5 cm de espessura, cor branca e dimensões de 65 × 140 cm; 3 m de perfis de alumínio, de 2 × 4; 20 parafusos; e 4 rodízios. Após a montagem da parte hidráulica, com as bombas, o reservatório, as válvulas e as conexões, foram realizados testes para detectar possíveis vazamentos.

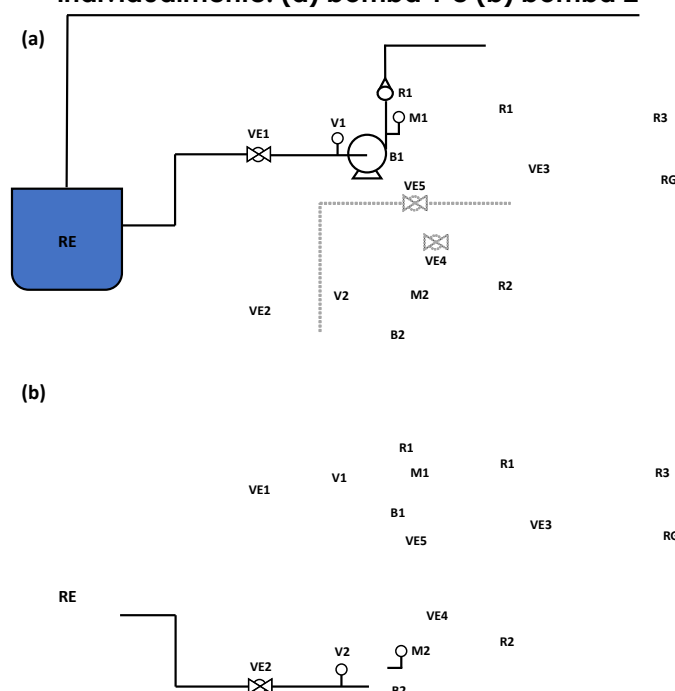
Além dos aspectos mencionados, deve-se destacar que a bancada apresenta algumas limitações: i) os instrumentos de medição de pressão e vazão são analógicos; ii) o sistema opera apenas com água à temperatura ambiente; iii) não foi testado com outros fluidos; iv) não registra dados de tensão e corrente elétricas para o cálculo da potência das bombas; e v) não possui mecanismo de automação para acionar o registro de gaveta (RG). Entretanto, a bancada pode ser aprimorada com o uso de sensores de pressão e de vazão. Sugere-se também a instalação de instrumentos para medição da tensão e da corrente elétricas nos motores das bombas.

Testes experimentais

Sistema operando com as bombas individualmente

Inicialmente, foram conduzidos testes com as bombas operando individualmente, a fim de obter a curva característica de cada bomba. O teste consistiu em ligar inicialmente a bomba 1, mantendo a bomba 2 desligada. Para isso, foram abertas as válvulas VE1 e VE3, mantendo-se fechadas as válvulas VE2, VE4 e VE5. Assim, o sistema operou em circuito fechado, com a bomba 1 funcionando isoladamente, conforme apresentado na Figura 3(a).

Figura 3 – Esquemas do arranjo experimental do sistema hidráulico operando com as bombas individualmente: (a) bomba 1 e (b) bomba 2



Fonte: elaborada pelos autores.

Com o reservatório preenchido com água, o teste foi iniciado com o registro de gaveta (RG) parcialmente aberto, de modo a obter uma vazão de $Q = 500$ L/h. Nessa condição, foram registrados os valores de pressão no vacuômetro e no manômetro (V1 e M1). Depois, o RG foi progressivamente aberto, permitindo a passagem de maiores vazões de água até sua abertura completa. A abertura do RG foi ajustada de modo a obter vazões de 1.000, 1.250, 1.500, 1.750 e 2.000 L/h, medidas no rotâmetro R1. Para cada vazão, foram registradas as pressões no vacuômetro (V1) e no manômetro (M1).

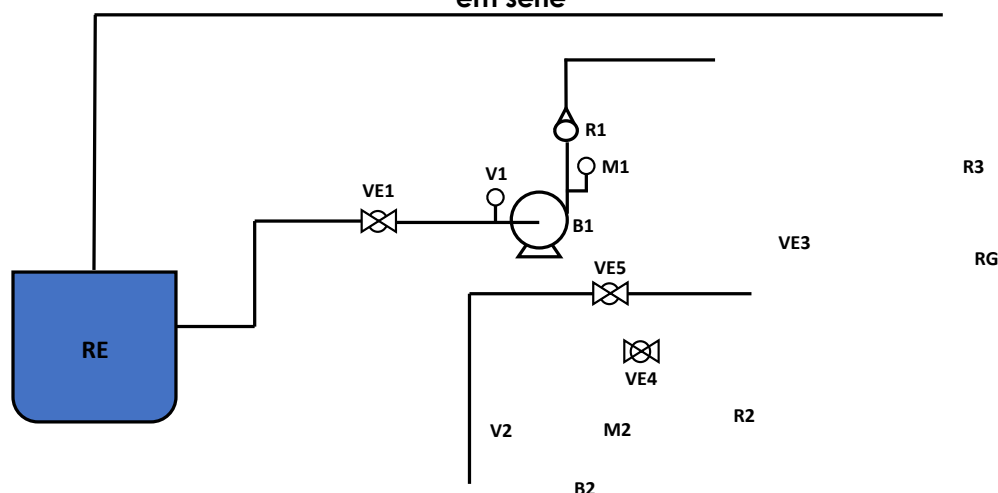
Para o teste com apenas a bomba B2 em operação, foi realizado um procedimento semelhante. As válvulas VE2 e VE4 foram abertas, enquanto as válvulas VE1, VE3 e VE5 foram fechadas. Com essa configuração, o sistema operou em circuito fechado com a bomba B2 (Figura 3b). Os registros de vazão e das pressões vacuométrica e manométrica foram realizados da mesma forma que no teste com a bomba B1. Em ambos os casos, o primeiro dado de pressão vacuométrica e manométrica foi obtido com o RG parcialmente aberto, ajustado de modo a proporcionar uma vazão de $Q = 500$ L/h. Para obter os demais dados de pressão, o registro de gaveta (RG) foi progressivamente aberto, permitindo a obtenção de outras vazões. A abertura do RG foi ajustada para 1.000, 1.250, 1.500, 1.750 e 2.000 L/h, conforme realizado no teste com a bomba B1.

Sistema operando em série

A bancada didática foi construída para operar em duas configurações. Isso é possível graças à configuração do encanamento, que permite, por meio da abertura ou do fechamento de válvulas de esfera específicas, adaptar o sistema às associações em série ou em paralelo.

Para a bancada operar na configuração em série, as válvulas VE2 e VE3 foram fechadas, enquanto as válvulas de esfera VE1, VE4 e VE5 foram abertas. Dessa forma, o sistema operou em associação em série, com a água sendo succionada do reservatório pela bomba B1 e recalçada para a bomba B2, que, por sua vez, recalçou o fluido de volta ao reservatório (RE), conforme apresentado na Figura 4. Para a construção da curva característica experimental do sistema operando em série, o primeiro dado registrado foi obtido com o RG parcialmente aberto, de modo a se obter uma vazão de 500 L/h, medida no rotâmetro R3. Nessa condição, foram registradas as pressões no vacuômetro V1 e no manômetro M2. Depois, o RG foi progressivamente aberto, de modo a se obterem vazões de 1.000, 1.250, 1.500, 1.750 e 2.000 L/h, até atingir a abertura completa. Para cada uma dessas vazões, foram registradas as pressões no vacuômetro (V1) e no manômetro (M1). A linha tracejada na Figura 4 indica que não houve escoamento do fluido de trabalho nessa parte do encanamento.

Figura 4 – Esquema do arranjo experimental do sistema hidráulico para operação em associação em série

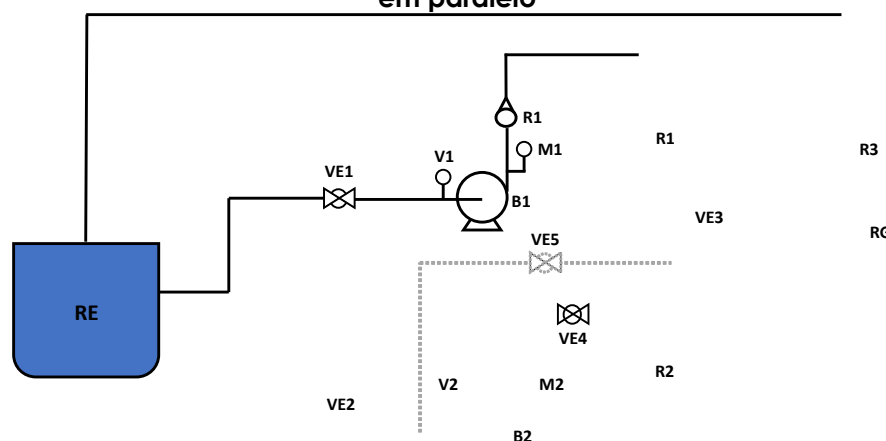


Fonte: elaborada pelos autores.

Sistema operando em paralelo

Para operar o sistema hidráulico na configuração em paralelo, foram estabelecidas condições específicas de abertura e fechamento das válvulas de esfera. Nessa configuração, a válvula VE5 foi mantida fechada, enquanto as válvulas VE1, VE2, VE3 e VE4 permaneceram abertas. Após o acionamento simultâneo de ambas as bombas (B1 e B2), a água foi succionada do reservatório (RE) e recalçada em circuito fechado de volta ao próprio reservatório, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema do arranjo experimental do sistema hidráulico para operação em associação em paralelo



Fonte: elaborada pelos autores.

O primeiro dado registrado foi obtido com o registro de gaveta (RG) parcialmente aberto. As pressões no vacuômetro e no manômetro foram registradas em V1 e M1 ou em V2 e M2; sendo muito semelhantes. Depois, o RG foi aberto em diferentes posições e registrados os valores de vazão (em R3), pressão vacuométrica e pressão manométrica (em V1 e M1, ou em V2 e M2). Esta operação foi realizada até o RG ficar completamente aberto. Não foram registrados os valores da vazão nos rotâmetros R1 e R2 pois a vazão da configuração em paralelo foi a soma da vazão de cada bomba. O registro da vazão foi feito no rotâmetro R3. A linha tracejada observada na Figura 5 indica que não houve escoamento do fluido de trabalho por esse segmento.



RESULTADOS

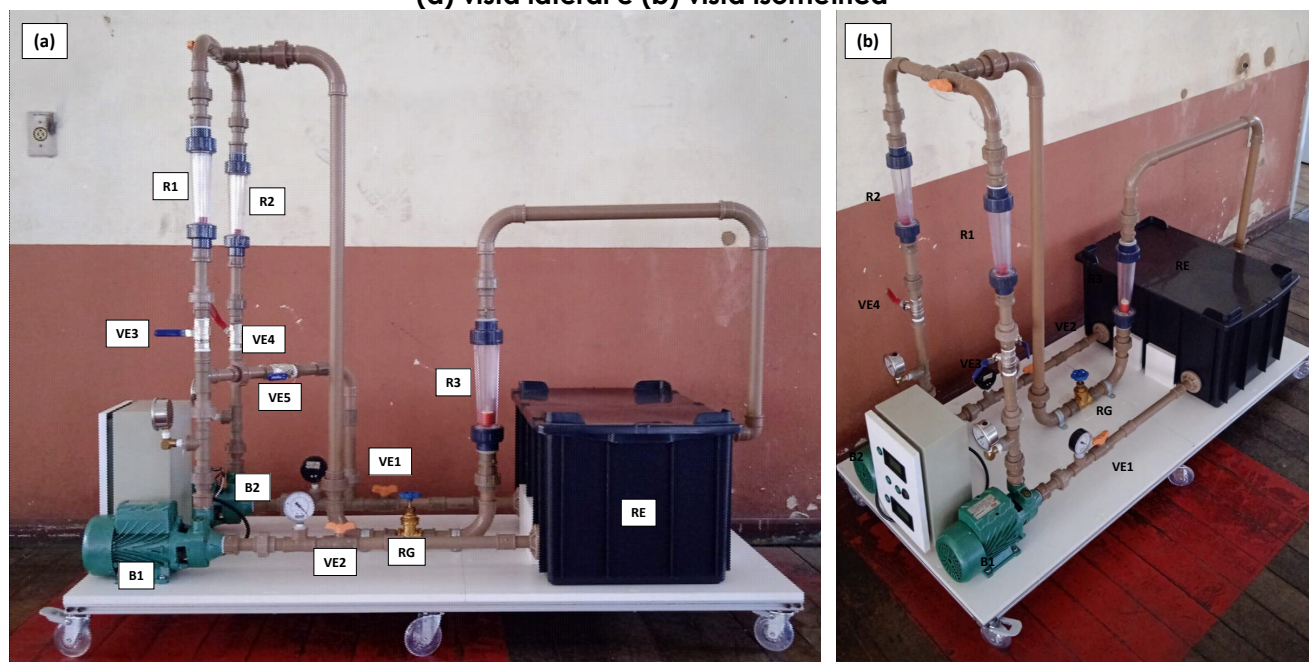
Os resultados foram divididos em dois tópicos: (i) o primeiro apresenta a bancada, indicando suas partes e sua conformidade com o arranjo experimental definido e com o desenho desenvolvido para a construção; e (ii) o segundo apresenta a validação do sistema, por meio das curvas características obtidas com cada bomba operando individualmente e com ambas operando nas configurações em série e em paralelo. Foi realizada uma comparação entre as curvas obtidas experimentalmente para as associações e aquelas determinadas por meio de cálculos teóricos, utilizando-se como referência os dados de uma bomba operando isoladamente, considerando que as duas bombas são idênticas.

Bancada hidráulica experimental

A Figura 6 apresenta duas fotografias da bancada hidráulica experimental, construída com base no arranjo experimental previamente definido e no desenho desenvolvido no *SolidWorks*. Pode-se observar que o sistema foi construído em conformidade com o arranjo e o desenho previamente estabelecidos. O sistema apresentou os principais componentes hidráulicos, constituídos por um reservatório, duas bombas centrífugas, um sistema de encanamento e instrumentos de medição de vazão e pressão. Além disso, constatou-se que o sistema foi configurado para operar em circuito fechado. O fluido de trabalho, succionado do reservatório, é recalcado de volta ao próprio reservatório.

Na Figura 6(a), observam-se os instrumentos de medição de vazão e pressão, bem como suas posições na tubulação. Essa disposição está em conformidade com o desenho desenvolvido com base no arranjo experimental do sistema. Também pode ser observada a tubulação na qual se encontra a válvula de esfera VE5, responsável por permitir a configuração do sistema para operação em série. A Figura 6(b) apresenta uma vista isométrica do sistema, mostrando claramente todo o sistema de encanamento. Nas fotografias, também se observa que todo o sistema foi montado sobre uma estrutura de suporte formada por uma base em MDF, perfis de alumínio de 2 x 4 e 4 rodízios, destinados a facilitar seu deslocamento.

**Figura 6 – Fotografia da bancada hidráulica construída para o estudo de associação de bombas:
(a) vista lateral e (b) vista isométrica**



Fonte: elaborada pelos autores.

Testes experimentais

Análise das bombas funcionando individualmente

Na Tabela 1, são apresentados os dados de vazão e das pressões manométrica e vacuométrica, obtidos experimentalmente com as bombas operando individualmente. Os dados de pressão foram usados para determinar a altura manométrica (H) pela equação (1), em que P_m é a pressão manométrica, P_v é a pressão vacuométrica, γ é o peso específico da água e D_c é a distância entre os relógios dos medidores de pressão. O peso específico da água utilizado na equação foi de 9780 N/m^3 . A distância D_c foi de $0,19 \text{ m}$.

$$H = \frac{P_m + P_v}{\gamma} + D_c \quad \text{Eq. (1)}$$



Tabela 1 – Dados de vazão, pressão e altura manométrica das bombas operando individualmente

Q (L/h)	Q (m ³ /s) x 10 ⁻⁴	Bomba 1			Bomba 2		
		P _m (Pa) x 10 ⁴	P _v (Pa)	H (m)	P _m (Pa) x 10 ⁴	P _v (Pa)	H (m)
500	1,39	21,0	0	21,7	20,3	0	21,1
1000	2,78	16,9	0	17,5	17,2	0	15,2
1250	3,47	12,3	0	12,7	13,1	0	11,6
1500	4,17	7,6	1863	8,1	8,3	1863	7,7
1750	4,86	3,9	2370	4,4	3,4	2370	3,4
2000	5,56	0	3386	0,5	-	-	-

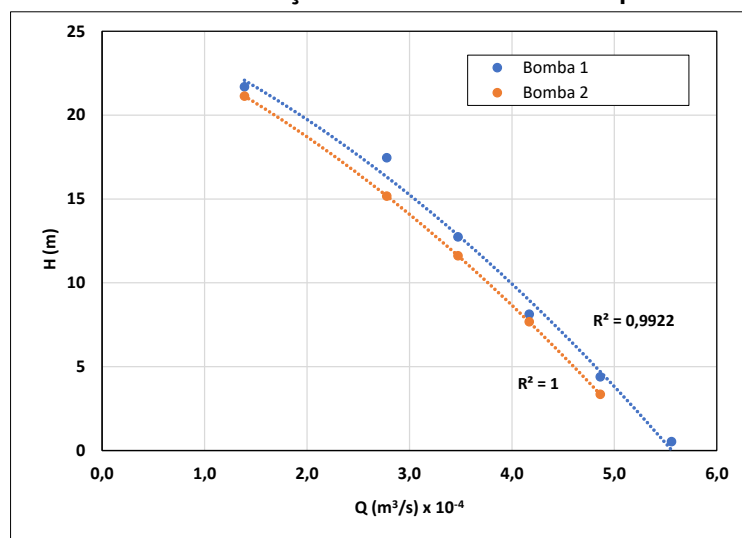
Fonte: elaborada pelos autores.

A Figura 7 mostra a relação entre a vazão e a altura manométrica das bombas operando individualmente. Pode-se observar que as curvas características das bombas são semelhantes entre si, apresentando pequenas diferenças que podem ser atribuídas às características construtivas das bombas ou às incertezas associadas aos instrumentos de medição de pressão e vazão. Entretanto, o perfil das curvas do tipo *rising* foi observado em ambas as bombas. As curvas características foram determinadas por meio de um ajuste polinomial de segunda ordem. Os coeficientes das equações correspondentes às curvas características das bombas 1 e 2 evidenciam a semelhança entre elas. O comportamento das curvas indica que, com o aumento da vazão, ocorre uma redução da altura manométrica, característica compatível com o perfil *rising*.

$$\text{Bomba 1: } H = 26,253 - 2,4391Q - 0,4099Q^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\text{Bomba 2: } H = 25,555 - 2,6287Q - 0,3987Q^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

Figura 7 – Altura manométrica em função vazão das bombas operando individualmente



Fonte: elaborada pelos autores.



Na Tabela 2, são apresentados os dados obtidos dos testes experimentais do sistema operando em associação em paralelo e em série. Os dados de pressão e vazão foram utilizados para determinar, pela equação (1), a altura manométrica. As unidades dos dados de vazão e pressão foram transformadas em unidades compatíveis para obter a altura manométrica em m.

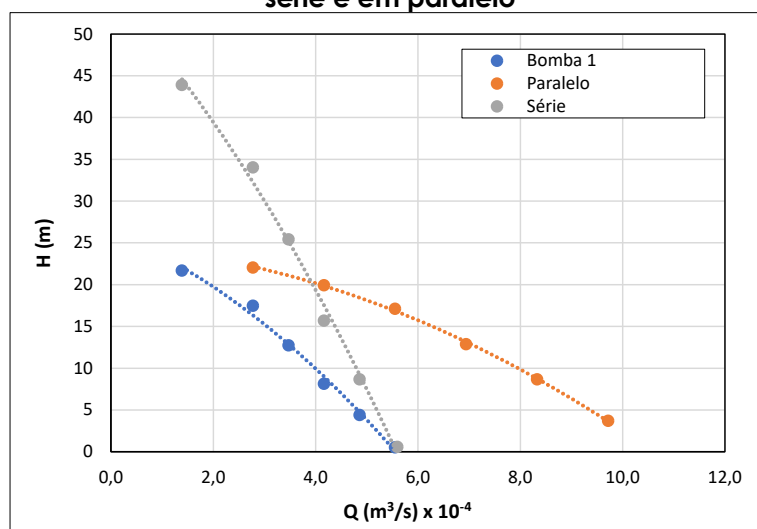
Tabela 2 – Dados de vazão, pressão e altura manométrica das bombas operando em paralelo e em série

Paralelo					Série				
Q (L/h)	Q (m ³ /s) x10 ⁻⁴	P _m (Pa) x10 ⁴	P _v (Pa)	H (m)	Q (L/h)	Q (m ³ /s) x10 ⁻⁴	P _m (Pa) x10 ⁴	P _v (Pa)	H (m)
1000	2,78	21,4	0	22,0	500	1,39	42,7	0	43,9
1500	4,17	19,3	0	19,9	1000	2,78	33,1	0	34,0
2000	5,56	16,5	0	17,1	1250	3,47	24,7	0	25,4
2500	6,94	12,4	0	12,9	1500	4,17	15,2	0	15,7
3000	8,33	8,3	0	8,6	1750	4,86	8,3	0	8,6
3500	9,72	3,4	0	3,7	2000	5,60	0	3759	0,6

Fonte: elaborada pelos autores.

As curvas características das bombas associadas em série e em paralelo são apresentadas na Figura 8. As curvas foram comparadas com os dados obtidos para a bomba B1 operando individualmente. Observou-se que a curva das bombas associadas em série apresentou, até a vazão de $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, um aumento na energia fornecida ao fluido, refletido em valores maiores de altura manométrica.

Figura 8 – Altura manométrica em função da vazão das bombas operando em associação em série e em paralelo



Fonte: elaborada pelos autores.



Esse comportamento é coerente com a teoria, segundo a qual a associação em série é utilizada em instalações que requerem elevadas alturas manométricas, como em condições que demandam maior pressão ou grandes diferenças de altura manométrica. Na associação em série, as bombas trabalham com a mesma vazão; entretanto, a altura manométrica total é maior, pois ela é determinada pela contribuição das alturas manométricas de cada uma das bombas.

A curva correspondente à associação das bombas em paralelo, apresentada na Figura 8, apresentou valores de vazão maiores para uma dada altura manométrica, quando comparada à curva característica da bomba B1. Esse resultado também foi coerente com a teoria, segundo a qual, quando bombas operam em paralelo, espera-se um aumento na vazão do sistema, não se observando aumento na energia fornecida ao fluido de trabalho; ou seja, não deverá haver valores de altura manométrica maiores.

A associação em paralelo é utilizada em sistemas nos quais se busca aumentar a vazão e obter maior flexibilidade em relação à demanda, podendo-se acionar ou desligar bombas conforme a necessidade operacional. Devido à existência de perdas de carga, a vazão resultante da associação de bombas em paralelo é sempre menor do que a soma algébrica das vazões de cada uma das bombas funcionando isoladamente.

Teoricamente, a curva característica de uma bomba pode ser descrita por uma equação polinomial de segundo grau, da seguinte forma:

$$H = a_0 - a_1Q - a_2Q^2 \quad \text{Eq. (4)}$$

De acordo com Alé (2011), para obter a equação teórica da curva característica de duas bombas iguais associadas em série, deve-se considerar que a altura manométrica da associação em série é o dobro daquela fornecida por uma única bomba para a mesma vazão ($H_s = 2H$). Nesse sentido, a Equação (4) é multiplicada por dois. A equação resultante é:

$$H = 2a_0 - 2a_1Q - 2a_2Q^2 \quad \text{Eq. (5)}$$

No caso de duas bombas iguais associadas em paralelo, a vazão da associação é duas vezes a vazão de uma bomba só ($Q_p = 2Q$). Dessa forma, a altura manométrica é dividida por um fator de dois, mas só na parte da equação que tem a variável Q . A equação resultante é:



$$H = a_0 - \frac{a_1}{2}Q - \frac{a_2}{4}Q^2 \quad \text{Eq. (6)}$$

Considerando a equação da curva característica da bomba B1, apresentada na Equação (2), podem ser obtidas as equações teóricas das curvas características das bombas associadas em série e em paralelo. As equações são as seguintes:

$$\text{Série: } H = 52,507 - 4,8782Q - 0,8197Q^2 \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\text{Paralelo: } H = 26,253 - 1,2196Q - 0,1025Q^2 \quad \text{Eq. (8)}$$

A partir do ajuste polinomial dos dados experimentais representados na Figura 8 para as curvas das bombas associadas em série e em paralelo, foram obtidas as seguintes equações:

$$\text{Série: } H = 52,511 - 4,7939Q - 0,7935Q^2 \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\text{Paralelo: } H = 25,623 - 1,2243Q - 0,1027Q^2 \quad \text{Eq. (10)}$$

Pode-se observar, a partir das Equações (9) e (10), que correspondem às curvas experimentais, uma elevada semelhança em relação às Equações (7) e (8), correspondentes às curvas teóricas. Os coeficientes das equações polinomiais foram semelhantes, e as diferenças podem ser atribuídas às perdas de carga presentes no sistema hidráulico, às características reais das bombas e às incertezas associadas às medições experimentais. Com isso, os resultados obtidos corroboram a adequação da bancada experimental para o estudo das associações de bombas, indicando que ela pode ser utilizada em aulas experimentais.

Uma análise quantitativa deve considerar a incerteza associada aos modelos matemáticos obtidos experimentalmente com o teórico. A incerteza de H pode ser determinada pela equação (11):

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sigma_{Pm}^2 + \sigma_{Pv}^2}{\gamma^2} + \sigma_m^2} \quad \text{Eq. (11)}$$

em que $\sigma_{Pm} = 3447$ Pa, $\sigma_{Pv} = 1693$ Pa, $\gamma = 9780$ N/m³ e $\sigma_m = 0,001$ m. O valor da incerteza de H foi de $\pm 0,39$ m. Determinando o valor de H calculado para uma vazão de 4 m³/s, utilizando as Equações (7) e (9), correspondentes,



respectivamente, às curvas teórica e experimental da associação em série, obtiveram-se valores de altura manométrica de $H = 19,88$ m e $H = 20,64$ m. Por outro lado, considerando os valores de H para a mesma vazão e utilizando as Equações (8) e (10), correspondentes, respectivamente, às curvas teórica e experimental da associação em paralelo, obtiveram-se valores de altura manométrica de $H = 19,73$ m e $H = 19,08$ m. Considerando a incerteza estimada para H , é possível afirmar que os valores são estatisticamente semelhantes dentro da margem de erro.

A bancada mostrou-se adequada para a realização dos testes experimentais e pode ser operada por uma única pessoa. A bancada foi estruturada com base em um reservatório, duas bombas, um sistema de encanamento hidráulico e instrumentos de medição. Sua principal funcionalidade é permitir o estudo da associação de bombas centrífugas, com foco na coleta de dados de vazão e pressão para a construção das curvas características e a comparação dos resultados experimentais com as previsões teóricas. O projeto atingiu o objetivo de desenvolver e validar uma bancada para o estudo da associação de bombas em um sistema hidráulico.

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a bancada pode constituir uma ferramenta importante para complementar, por meio de aulas experimentais, os conceitos abordados em sala de aula.

CONCLUSÕES

Os resultados demonstram a viabilidade da construção e utilização da bancada didática para o estudo da associação de bombas, constituída por quatro componentes básicos: um reservatório, duas bombas centrífugas, um sistema de encanamento e instrumentos de medição de vazão e pressão. O princípio adotado para a construção da bancada destinada ao estudo da associação de bombas em série e em paralelo baseou-se na configuração da tubulação e no conjunto de válvulas de esfera, que permitiram adaptar o sistema para operar em ambas as configurações. Os resultados experimentais mostraram-se coerentes com a teoria sobre sistemas hidráulicos com bombas associadas, segundo a qual bombas associadas em série aumentam a pressão mantendo a vazão, enquanto, em paralelo, aumentam a vazão mantendo a pressão. A bancada mostrou-se adequada ao propósito proposto, uma vez que as curvas características obtidas experimentalmente para as associações em série e em



paralelo e, principalmente, as equações correspondentes apresentaram elevada semelhança com as equações teóricas determinadas.

REFERÊNCIAS

- ALÉ, J. A. V. **Sistemas fluidomecânicos: sistemas de bombeamento**. Rio Grande do Sul: PUC-RS, 2011.
- BONUMÁ, N. B. **Aula prática: curvas características e associação de bombas centrífugas**. 2016. Roteiro de aula prática (Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- DOS SANTOS, A. S. *et al.* Dimensionamento de uma associação de bombas hidráulicas com uso de Arduino como parâmetro de automação. **Revista Engenharia de Interesse Social**, v. 5, n. 6, p. 129–149, 2020.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997.
- MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- NICOLI, E. P. *et al.* **Análise experimental de curvas de bombas centrífugas radiais**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2004.
- OLIVEIRA, F. S. **Readequação da prática de laboratório de Engenharia Química: associação de bombas**. 2017. Monografia (Curso de Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2017.
- SANT'ANA, J. M. **Sistema de bombas hidráulicas em nível de bancada para o estudo da associação de bombas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica e Energia) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.