



ELABORAÇÃO DE UM MÓDULO DIDÁTICO DE ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS COMO FERRAMENTA DE APRENDIZAGEM DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC MODULE ON PUMP ASSOCIATION AS A LEARNING TOOL FOR FLUID MECHANICS

Breno B. Gomes¹, Evellyn B. da Costa², Jingyu Su³,
Alexandre R. Torres⁴, Erika de Q. Eugenio⁵

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p445-466.2026

RESUMO: O ensino de Mecânica dos Fluidos em cursos de Engenharia apresenta desafios na articulação entre teoria e prática, sendo favorecido pela adoção de metodologias experimentais. Nesse sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um módulo didático de baixo custo para estudo de associações de bombas centrífugas em disciplinas de Engenharia Química. Utilizou-se a Aprendizagem Baseada em Projetos (*Project-Based Learning*), integrando teoria e prática e promovendo habilidades técnicas e colaborativas. O protótipo, operando em bomba isolada, série e paralelo, permitiu comparar curvas teóricas e experimentais, com erros máximos de 22,50%, 19,44% e 37,15%, respectivamente. Os resultados demonstram o potencial do uso de protótipos como recurso acessível e eficaz no Ensino de Engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Aprendizagem Baseada em Projetos; bombas centrífugas; Ensino de Engenharia.

ABSTRACT: The teaching of Fluid Mechanics in Engineering programs faces persistent challenges in effectively connecting theoretical concepts with practical applications, and can be significantly enhanced through experimental learning methodologies. In this context, this work presents the development of a low-cost didactic module for studying centrifugal pump associations in Chemical Engineering courses. The methodology applied was Project-Based Learning, integrating theory and practice while fostering technical and collaborative skills. The prototype, operating in single pump, series, and parallel configurations, enabled the comparison between theoretical and experimental curves, with maximum errors of 22.50%, 19.44%, and 37.15%, respectively. The results highlight the potential of prototypes as accessible and effective resources for engineering education.

KEYWORDS: Project-Based Learning; centrifugal pumps; Engineering Education.

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Química e Ambiental, brenobotelho92@gmail.com

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Química e Ambiental, evellyn.costa@discentes.fat.uerj.br

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Química e Ambiental, jingyu.su@discentes.fat.uerj.br

⁴ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Química e Ambiental, artorres@fat.uerj.br

⁵ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Química e Ambiental, erikaqe@fat.uerj.br



INTRODUÇÃO

A formação acadêmica de um profissional de Engenharia engloba diversos campos de conhecimento, e sua grade curricular busca abordar, de forma interdisciplinar, os fenômenos que permeiam a natureza, tendo como finalidade a aplicação desses ensinamentos em prol do desenvolvimento de projetos que irão beneficiar a sociedade. Segundo Castro (2010), os currículos de Engenharia vêm sofrendo diversas alterações ao longo do tempo com o objetivo de preparar seus discentes para atuar no setor produtivo perante as contínuas mudanças do ambiente econômico e social no qual estão inseridos. As Diretrizes Curriculares são pautadas em garantir que os alunos desenvolvam competências e habilidades ao longo da graduação, como, por exemplo, o desenvolvimento de trabalhos de síntese e integração dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, atividades complementares, iniciações científicas, projetos multidisciplinares, desenvolvimento de módulos didáticos e atividades empreendedoras. Contudo, essas reformas não têm sido inteiramente bem executadas, dentre outras razões, por priorizarem a concentração de conteúdos como forma de assegurar a formação de um profissional qualificado.

Tal perspectiva torna-se incompatível com o exercício da função de um engenheiro, visto que a solução de um problema não se restringe à aplicação de métodos predefinidos, devido às peculiaridades e exceções inerentes a cada situação. Além disso, o mercado de trabalho exige que os egressos de Engenharia sejam independentes, capazes de entender um problema técnico e buscar uma solução eficaz ou, ainda, de trabalhar em equipes multidisciplinares, que muitas vezes não estão associadas à sua área de atuação (Teixeira, Silva e Brito, 2019). Dessa forma, é essencial incentivar iniciativas que ampliem o uso de metodologias ativas no ensino superior, promovendo maior integração entre teoria e prática.

Essa necessidade também é reforçada pelas Diretrizes Curriculares Nacionais dos cursos de Engenharia, estabelecidas pela Resolução CNE/CES nº2, de 24 de abril de 2019, que determina que o Projeto Pedagógico do Curso (PPC) deve assegurar o desenvolvimento de competências e habilidades profissionais, além de estimular o uso de metodologias ativas de aprendizagem centradas no aluno (Brasil, 2019).

Essas demandas tornam-se ainda mais relevantes diante das transformações tecnológicas associadas à Indústria 4.0, que exigem profissionais com capacidade de resolução de problemas, habilidades digitais e trabalho colaborativo. Diante desse cenário, a Educação 4.0 surge como uma abordagem voltada à integração



entre tecnologia, experimentação e metodologias ativas (Puncreobutr, 2016). Dessa forma, o estudante passa a assumir um papel ativo na construção do conhecimento, enquanto o professor atua como mediador do processo de aprendizagem, estimulando a inovação, o trabalho colaborativo em equipe e a aplicação de tecnologias em situações reais (Neto e Fiorin, 2021; Medeiros e Neto, 2024; Damasceno, 2022; Cunha, 2025).

Entre as diversas abordagens educacionais aplicadas ao Ensino Superior, destaca-se a Aprendizagem Baseada em Projetos (*Project-Based Learning* – PjBL) por desafiar os alunos a lidar com casos reais. Conforme Ferrarini, Saheb e Torres (2019), esse tipo de aprendizagem consiste em trabalhar com temas reais próximos à realidade do aluno, buscando aumentar sua motivação de forma mais significativa e contextualizada por meio do desenvolvimento de projetos concretos e da criação de produtos ou soluções tecnológicas. Além disso, promove o desenvolvimento de competências e habilidades, como trabalho em equipe, comunicação, gestão do tempo e aprendizagem contínua (Godoi *et al.*, 2020; Landaverde-Alvarado, 2024).

O curso de Engenharia Química apresenta um conjunto de disciplinas complexas, tais como Operações Unitárias e Fenômenos de Transporte, que demandam uma ampla base de conhecimentos prévios, havendo a necessidade de buscar alternativas para ministrar esses conteúdos de forma que atinjam com clareza seus objetivos. Nesse contexto, a PjBL é uma forma eficaz de aperfeiçoamento não só da metodologia de ensino, mas também do desenvolvimento das competências e habilidades de cada aluno. Ruslan *et al.* (2021) mostraram que a criação de um macaco hidráulico por alunos do primeiro ano do curso de Engenharia Química permitiu integrar conteúdos de duas disciplinas, promovendo a aprendizagem ativa, o trabalho em equipe e a aplicação prática de conceitos fundamentais. A experiência demonstrou que projetos simples favorecem o engajamento e superam limitações estruturais, aproximando teoria e prática.

Sob essa perspectiva, o Ciclo de Aprendizagem Experiencial proposto por Kolb (1984) fornece suporte teórico para compreender como as atividades práticas contribuem para a consolidação da aprendizagem. Segundo o autor, a aprendizagem ocorre por meio de quatro etapas inter-relacionadas: experiência concreta, observação reflexiva, conceituação abstrata e experimentação ativa.

No contexto da Engenharia, a experiência concreta ocorre a partir da interação dos estudantes com atividades experimentais e módulos didáticos. Em seguida, a observação reflexiva permite analisar os fenômenos identificados



durante a prática. A conceituação abstrata acontece quando os alunos relacionam os resultados aos fundamentos teóricos discutidos em sala de aula. Por fim, a experimentação ativa é estimulada pela proposição de soluções e pela análise de diferentes condições operacionais durante a execução do projeto.

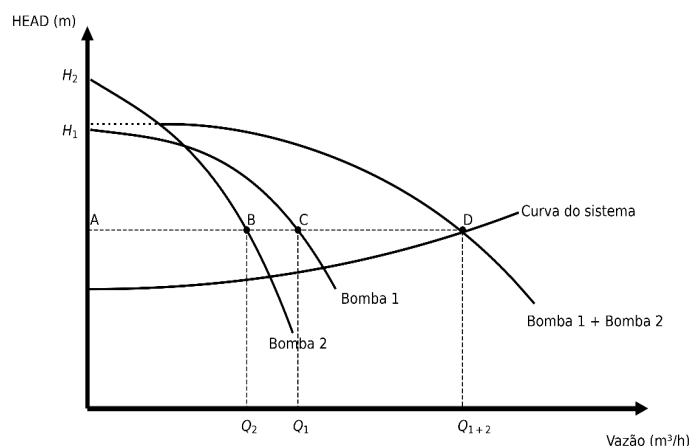
A Mecânica dos Fluidos é um campo de extrema importância na Engenharia, abrangendo conhecimentos fundamentais para projetar processos e entender a eficiência de equipamentos que utilizam fluidos. Além disso, essa área representa uma oportunidade de aplicação de abordagens ativas de aprendizagem, favorecendo maior integração entre teoria e prática. Por esses motivos, o estudo das bombas centrífugas torna-se de extrema importância, já que esses equipamentos estão entre os mais utilizados na indústria. Essa classe de bomba tem como função criar um fluxo de líquido, convertendo energia mecânica em energia de pressão e cinética, utilizando, para isso, um impulsor rotativo conhecido como rotor. Além disso, a operação com múltiplas bombas é uma prática amplamente empregada na indústria, na qual esses equipamentos podem ser associados em série ou em paralelo, de acordo com as necessidades do processo (Mattos e Falco, 1998).

A configuração em paralelo é aplicável em projetos que demandam aumento da vazão fornecida, maior flexibilidade na variabilidade de vazão ou a garantia de continuidade no fornecimento. Esse tipo de sistema é caracterizado por possuir alturas manométricas totais ($HEAD_{Total}$) equivalentes às das bombas operando individualmente (Equação 1). Por outro lado, a vazão total (Q) é proporcional ao número de bombas presentes no sistema (Equação 2). No caso em que esses equipamentos dinâmicos possuem o mesmo modelo, a vazão de trabalho equivale ao dobro da vazão individual de cada bomba operando isoladamente. A Figura 1 ilustra a curva característica resultante de duas bombas distintas sendo associadas em paralelo.

$$HEAD_{Total} = HEAD_1 = HEAD_2 \quad \text{Eq. [1]}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \text{Eq. [2]}$$

Figura 1 – Curva característica de bombas diferentes operando no sistema em paralelo



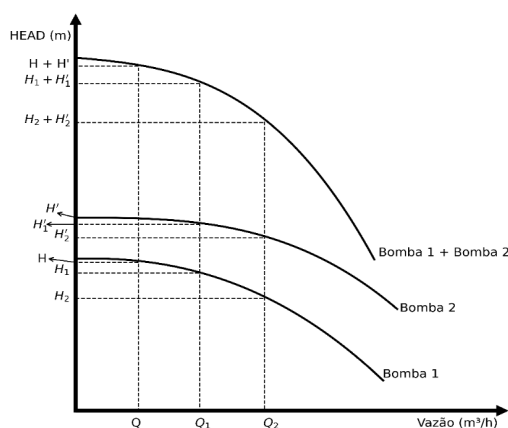
Fonte: elaborada pelos autores.

Outra necessidade que pode surgir em projetos é o aumento da altura manométrica ($HEAD$). Para isso, utiliza-se a associação de bombas em série, na qual a saída de uma bomba é conectada à sucção da outra. Nesse arranjo, a vazão (Q) permanece constante para todas as bombas (Equação 3), enquanto a altura manométrica total ($HEAD_{Total}$) é obtida pela soma das alturas manométricas individuais (Equação 4), conforme apresentado pela Figura 2. Em situações em que esses tipos de equipamentos dinâmicos possuem o mesmo modelo, o $HEAD_{Total}$ é o dobro da $HEAD$ individual de cada bomba operando isoladamente.

$$Q = Q_1 = Q_2 \quad \text{Eq. [3]}$$

$$HEAD_{Total} = HEAD_1 + HEAD_2 \quad \text{Eq. [4]}$$

Figura 2 – Curva característica de bombas diferentes operando no sistema em série



Fonte: elaborada pelos autores.



Dessa forma, o trabalho tem como objetivo interligar os conhecimentos teóricos obtidos nas aulas de Mecânica dos Fluidos com a execução de um projeto com aplicação concreta dos princípios da Aprendizagem Baseada em Projeto (PjBL), que visa à construção de um módulo de associação de bombas que seja capaz de estudar e obter a curva característica da bomba em três configurações distintas, sendo elas: bomba isolada, bombas associadas em série e bombas associadas em paralelo.

METODOLOGIA

A construção do módulo didático de associação de bombas foi conduzida por uma equipe formada por discentes de Engenharia Química, sob a supervisão de docentes da área. O trabalho foi desenvolvido segundo os princípios da Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL). A aplicação da metodologia teve como objetivo promover a integração entre teoria e prática no ensino de Mecânica dos Fluidos, inserindo os estudantes em um problema aplicado de Engenharia relacionado à associação de bombas centrífugas. Dessa forma, buscou-se reduzir a fragmentação do conhecimento frequentemente observada no Ensino Superior, aproximando os conteúdos teóricos das situações experimentais reais vivenciadas durante o desenvolvimento do projeto.

O planejamento do projeto buscou exemplificar, de forma aplicada, conceitos fundamentais da Mecânica dos Fluidos, como vazão, altura manométrica (*HEAD*), associação de bombas, balanço de energia e perdas de carga em tubulações. Além da construção do protótipo, os discentes foram incentivados a interpretar fenômenos observados experimentalmente e a relacioná-los aos modelos utilizados nos cálculos e na previsão das curvas características da bomba.

Para o desenvolvimento do módulo didático de associação de bombas, a estrutura metodológica do projeto foi dividida em sete etapas:

1. Revisão dos fundamentos teóricos: a equipe envolvida no projeto fez um levantamento teórico sobre os sistemas hidráulicos, associação de bombas, instrumentação e mecânica dos fluidos, tendo como finalidade equalizar o conhecimento teórico dos envolvidos e criar uma base de referências bibliográficas. A condução das atividades práticas e a interpretação dos fenômenos hidráulicos foram fundamentadas em referências da área de Mecânica dos Fluidos, como Fox, McDonald e Pritchard (2004), bem como



os critérios fundamentais para garantir a confiabilidade da operação e na manutenção de bombas descritas em Mattos e Falco (1998).

2. Elaboração de um esboço do módulo didático: foram realizadas discussões e sessões de *brainstorming* acerca das possíveis ideias para o arranjo do módulo, das premissas a serem adotadas no projeto e dos materiais de baixo custo que poderiam ser utilizados. Entre as opções de projeto, foi decidido que seriam utilizadas duas bombas centrífugas, com três modos de operação possíveis: bomba isolada, bombas associadas em série e bombas associadas em paralelo.
3. Desenvolvimento da memória de cálculo: nesta fase, a principal atividade foi determinar as curvas teóricas características das bombas com base nos dados fornecidos pelo fabricante da bomba disponível, a fim de desenvolver o modelo teórico previsto para o sistema de bombeamento proposto. Para a realização dessa fase, utilizou-se o *software* Excel.
4. Contabilização de materiais e aquisição de recursos: um levantamento da demanda de infraestrutura, como condições elétricas e hidráulicas, foi realizado. Ademais, determinou-se o orçamento do projeto para a compra dos materiais de consumo.
5. Construção do módulo didático: nesta etapa, todos os integrantes se reuniram para a construção efetiva do módulo didático, sob orientação do docente responsável pelo projeto.
6. Comissionamento do módulo desenvolvido: realizaram-se testes operacionais para comparar os resultados experimentais com os dados teóricos previstos para as diferentes configurações de bombeamento. As divergências observadas entre teoria e prática estimularam os discentes a investigar fenômenos reais do sistema, utilizando o erro experimental como ferramenta de aprendizagem sobre as limitações e desafios em sistemas hidráulicos reais.
7. Redação de relatório técnico: foram organizadas e documentadas as atividades desenvolvidas, os cálculos realizados e os resultados experimentais obtidos durante a construção e a validação do módulo didático.

Após a conclusão do desenvolvimento do módulo didático, o sistema foi implementado de forma contínua como ferramenta experimental de apoio às aulas práticas da disciplina de Laboratório de Engenharia Química I. A coleta de dados e a aplicação do protótipo abrangeram seis semestres letivos,



compreendidos entre 2023.1 e 2025.2, totalizando a participação de seis turmas distintas do curso de Engenharia Química da FAT UERJ.

Com o objetivo de avaliar a percepção dos estudantes quanto à contribuição do protótipo para o processo de aprendizagem, foi aplicado um questionário voluntário, estruturado em escala Likert, aos discentes que já haviam concluído a disciplina, incluindo tanto estudantes que utilizaram o módulo experimental quanto aqueles que cursaram a disciplina anteriormente à sua implementação. A escala adotada variou de 1 a 5, em que: 1 corresponde a “Discordo fortemente (DF)”, 2 a “Discordo (D)”, 3 a “Indiferente (I)”, 4 a “Concordo (C)” e 5 a “Concordo fortemente (CF)”.

Materiais

O sistema experimental foi composto por duas bombas centrífugas (B1 e B2), modelo Dancor DP-60, responsáveis pelo fornecimento de energia hidráulica, associadas a um reservatório de 200 L para armazenamento de água. A rede de escoamento foi construída com aproximadamente 6 metros de tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ ", complementada por conexões em PVC roscáveis, tais como joelhos de 90°, *nipples*, conexões em "T", uniões e luvas compatíveis com a tubulação, além de mangueiras de cristal flexível, de modo a permitir o direcionamento do fluxo e a distribuição das linhas. O controle hidráulico foi garantido por oito válvulas de esfera de $\frac{1}{2}$ ", utilizadas para bloqueio do sistema, e por uma válvula de gaveta de $\frac{1}{2}$ ", destinada à manipulação da vazão de operação. O monitoramento do sistema foi realizado por meio de um vacuômetro com faixa de -30 a 0 inHg, instalado na linha de sucção, correspondente ao ponto P1. A pressão na descarga da bomba B1 foi medida no ponto P2, e a pressão na saída da bomba B2, no ponto P3, ambas determinadas por manômetros do tipo Bourdon com faixa de 0 a 145 psig. A vazão do sistema foi acompanhada por um rotâmetro com faixa de 0 a 100 L/h.

Procedimento experimental da associação das bombas

Para o estudo da curva da bomba, é necessário, em primeira instância, determinar o valor da vazão de trabalho (Q). Para isso, coletou-se uma certa quantidade de água em um intervalo de tempo, obtendo-se, assim, a vazão mássica da água por meio da Equação 5. Além disso, os dados foram obtidos em triplicata para cada alteração de vazão e de arranjo.



$$Q = \frac{\text{massa de água}}{\text{tempo}} \quad \text{Eq. [5]}$$

O controle da vazão de operação, por sua vez, foi realizado manualmente por meio da abertura e fechamento gradual da válvula do sistema, permitindo a obtenção de diferentes condições operacionais para o levantamento das curvas características das bombas.

Para a determinação do *HEAD*, é necessário utilizar equações distintas para cada tipo de arranjo na associação de bombas, que estão registradas na Tabela 1. As leituras de pressão são obtidas por manômetros que estão localizados na sucção (P_s) e na descarga (P_d) de cada bomba. Os subscritos 1, 2 e 3 referem-se às posições dos manômetros no aparato experimental, conforme apresentado na Figura 3.

Tabela 1 – Equações empregadas no cálculo da altura manométrica (HEAD) em diferentes configurações de escoamento

Configuração de escoamento	Equação para o cálculo do HEAD
Bomba isolada	$HEAD = \frac{P_s - P_d}{\rho \cdot g}$ Eq. [6]
Bombas associadas em série	$HEAD_{B1+B2} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + \frac{P_3 - P_2}{\rho \cdot g} = \frac{P_3 - P_1}{\rho \cdot g}$ Eq. [7]
Bombas associadas em paralelo	$HEAD_{B1//B2} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} = \frac{P_3 - P_1}{\rho \cdot g}$ Eq. [8]

Fonte: elaborada pelos autores.

As equações registradas na Tabela 1 são obtidas a partir de algumas simplificações realizadas na equação da conservação da energia mecânica dos fluidos (Equação 9), adaptadas ao sistema em estudo. Para a realização dos cálculos, são considerados dois pontos de referência: um na sucção (s) da bomba e outro em sua descarga (d).



$$HEAD = \left(\frac{v_d^2}{2g} + z_d + \frac{P_d}{\rho g} \right) - \left(\frac{v_s^2}{2g} + z_s + \frac{P_s}{\rho g} \right) + h_{LT} \quad \text{Eq. [9]}$$

em que:

v = velocidade do fluido no ponto de referência (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

z = elevação no ponto de referência (m);

P = pressão no ponto de referência (Pa);

ρ = massa específica do fluido (kg/m³);

h_{LT} = perda de carga total do sistema (m).

No módulo construído, o diâmetro das tubulações se mantém constante, o que faz com que a velocidade do fluido não se altere, já que a área da seção transversal é igual nos dois pontos considerados. Por esse motivo, a contribuição da diferença entre os termos cinéticos no balanço energético do sistema é desconsiderada.

Além disso, os pontos de medição foram posicionados em cotas próximas ao longo do módulo experimental, apresentando diferença de elevação de aproximadamente 0,25 m. Dessa forma, o termo associado à energia potencial gravitacional foi considerado pouco representativo para o sistema estudado.

O sistema hidráulico desenvolvido possui configuração compacta, sendo composto por trechos curtos de tubulação em PVC de ½", válvulas, conexões, rotâmetro e mangueiras flexíveis, elementos que introduzem perdas de carga distribuídas e localizadas no escoamento. Entretanto, optou-se por não incorporar detalhadamente essas contribuições aos modelos teóricos adotados neste trabalho, assumindo-se inicialmente que tais efeitos apresentariam menor influência no comportamento global do sistema.

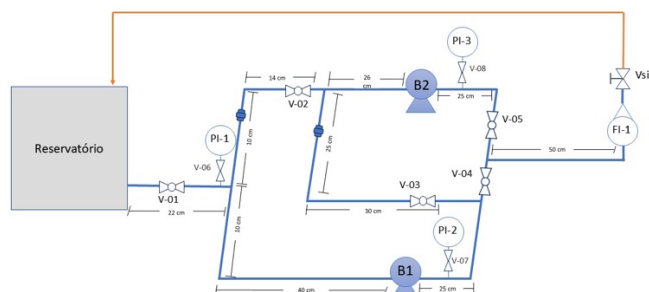
Por sua vez, as incertezas instrumentais associadas às medições de pressão e vazão foram consideradas na análise experimental. Para os manômetros e o vacuômetro, as incertezas estão relacionadas à classe de precisão dos instrumentos utilizados, refletindo diretamente na determinação da altura manométrica (HEAD).

Em relação à vazão, observou-se que, em determinadas condições operacionais, os valores excediam o limite da escala do rotâmetro. Dessa forma, o instrumento foi utilizado apenas como referência operacional, sendo a vazão determinada pelo método gravimétrico, a partir da massa de água coletada em um intervalo de tempo conhecido.

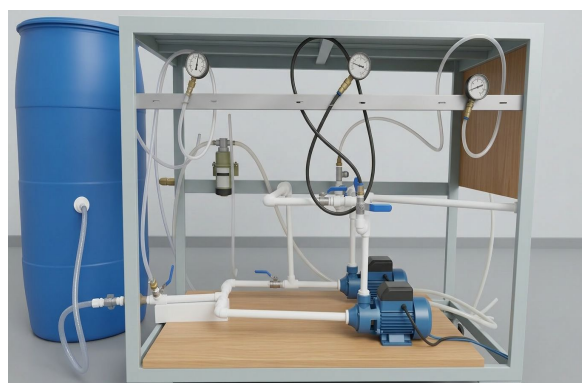
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta o esquema desenvolvido pelos estudantes para o módulo didático, construído a partir da etapa de discussão de ideias conduzida sob a orientação de um docente da área. Essa etapa, inserida no contexto da metodologia de Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL), possibilitou a integração de conceitos teóricos previamente estudados com a necessidade prática de estruturar um módulo aplicável ao ensino de Operações Unitárias. Durante o processo, os alunos foram estimulados a propor soluções e a justificar suas escolhas, o que resultou na definição e na disposição dos componentes presentes no sistema de associação de bombas, bem como das premissas adotadas para a operação e a modelagem do sistema. Dessa forma, o módulo contempla três configurações distintas de operação, permitindo o funcionamento de uma única bomba isolada, de duas bombas associadas em série e de duas bombas operando em paralelo.

Figura 3 – Esquema dimensional do módulo de sistema hidráulico com associações de bombas (a) e representação tridimensional do módulo didático desenvolvido (b)



(a)



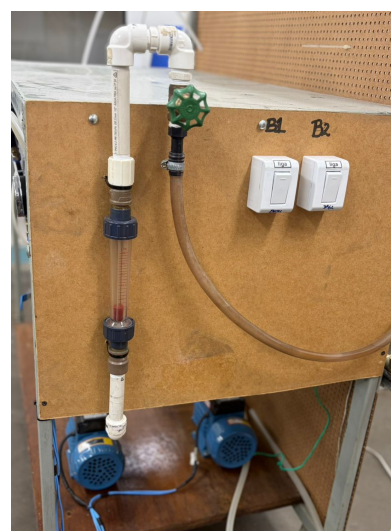
(b)

Fonte: acervo dos autores.

A Figura 3 apresenta os principais componentes do sistema: B1 e B2 correspondem às bombas centrífugas; PI-1 indica o vacuômetro; PI-2 e PI-3 representam os manômetros; V-01 a V-05 são válvulas de esfera utilizadas para bloqueio do fluxo de água; V-06 a V-08 correspondem às válvulas de esfera destinadas ao bloqueio do sistema de medição de pressão; FI-1 representa o rotâmetro; e Vsist refere-se à válvula de gaveta utilizada para a regulação da vazão do sistema.

Desse modo, foi desenvolvido o módulo didático apresentado na Figura 4, para ser utilizado como parte das atividades realizadas na disciplina de Laboratório de Engenharia Química I.

Figura 4 – Sistema experimental construído para estudo de bombas em diferentes configurações



Fonte: acervo dos autores.

Na bomba operando isoladamente, optou-se por determinar a curva da bomba B1. Para isso, as válvulas V-02, V-03, V-05 e V-08 permaneceram fechadas, enquanto as demais foram direcionadas na posição aberta. As leituras das pressões de sucção e descarga, essenciais para a caracterização do desempenho hidráulico da bomba, foram realizadas por intermédio dos medidores de pressão PI-01 e PI-02, respectivamente.

No sistema de bombas associadas em paralelo, que resultou em aumento da vazão, somente a válvula V-03 operou na condição totalmente fechada, enquanto as demais permaneceram abertas. Nesse tipo de operação, a indicação da pressão de alimentação do sistema foi realizada pelo vacuômetro



PI-01, enquanto as pressões de descarga de cada trecho em paralelo foram indicadas pelos manômetros PI-02 e PI-03.

Por sua vez, para o sistema associado em série, que proporcionou um maior *HEAD*, as válvulas V-01, V-03 e V-05 foram mantidas abertas. Para a medição das pressões de alimentação e descarga do sistema, foram utilizadas as leituras indicadas por PI-1 e PI-3, respectivamente.

Em todos os casos, a válvula do sistema (*Vsist*) foi manipulada lentamente até a posição totalmente fechada, correspondente ao ponto de *shut-off*. Esse procedimento é fundamental para determinar o comportamento da bomba na condição de máxima restrição à vazão, possibilitando a obtenção de um ponto de referência na curva característica.

Com base no manual da bomba fornecido pelo fabricante, podem ser calculadas as curvas características nas três configurações de operação das bombas. Como as duas bombas utilizadas no módulo didático são idênticas, na operação com bombas associadas em série, a vazão do sistema é igual à vazão da bomba isolada, enquanto o *HEAD* do conjunto de bombas em série equivale ao dobro do *HEAD* fornecido por uma única bomba. Por outro lado, na associação em paralelo, as bombas apresentam o mesmo *HEAD*, e a vazão do sistema é o dobro da vazão correspondente a uma bomba. A Tabela 2 apresenta as curvas características teóricas do sistema nas diferentes configurações de associação de bombas.

Tabela 2 – Equações das curvas características teóricas em diferentes modos de operação de bombas centrífugas

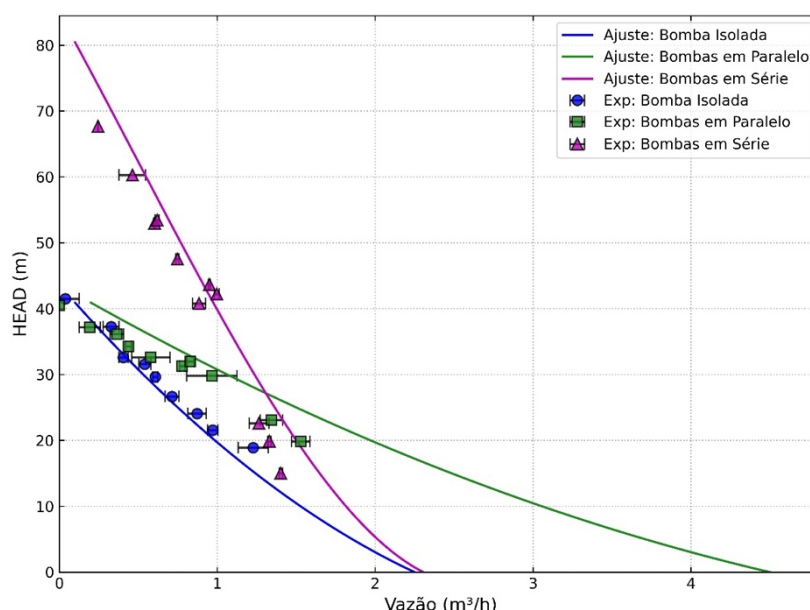
Modo de Operação	Curva Característica	Coefficiente de determinação (R^2)
Isolada	$HEAD_{B1} = -68,59\dot{q} + 40,27$	0,9829
Paralelo	$HEAD_{B1//B2} = 11,75\dot{q}^2 - 49,60\dot{q} + 43,64$	0,9978
Série	$HEAD_{B1+B2} = 94,01\dot{q}^2 - 198,41\dot{q} + 87,27$	0,9978

Fonte: elaborada pelos autores.

A Figura 5 apresenta a comparação entre os dados teóricos e experimentais das curvas características de bombas centrífugas nos três arranjos possíveis de operação do módulo. As curvas contínuas correspondem às regressões dos dados fornecidos pelo fabricante, conforme a Tabela 2. Por sua vez, os pontos indicam os valores experimentais, acompanhados das respectivas barras de erros associados à medição da vazão.



Figura 5 – Curvas características teórico e experimental obtidas no módulo didático nas configurações de bomba isolada (●), associação em série (●) e associação em paralelo (●)



Fonte: elaborada pelos autores.

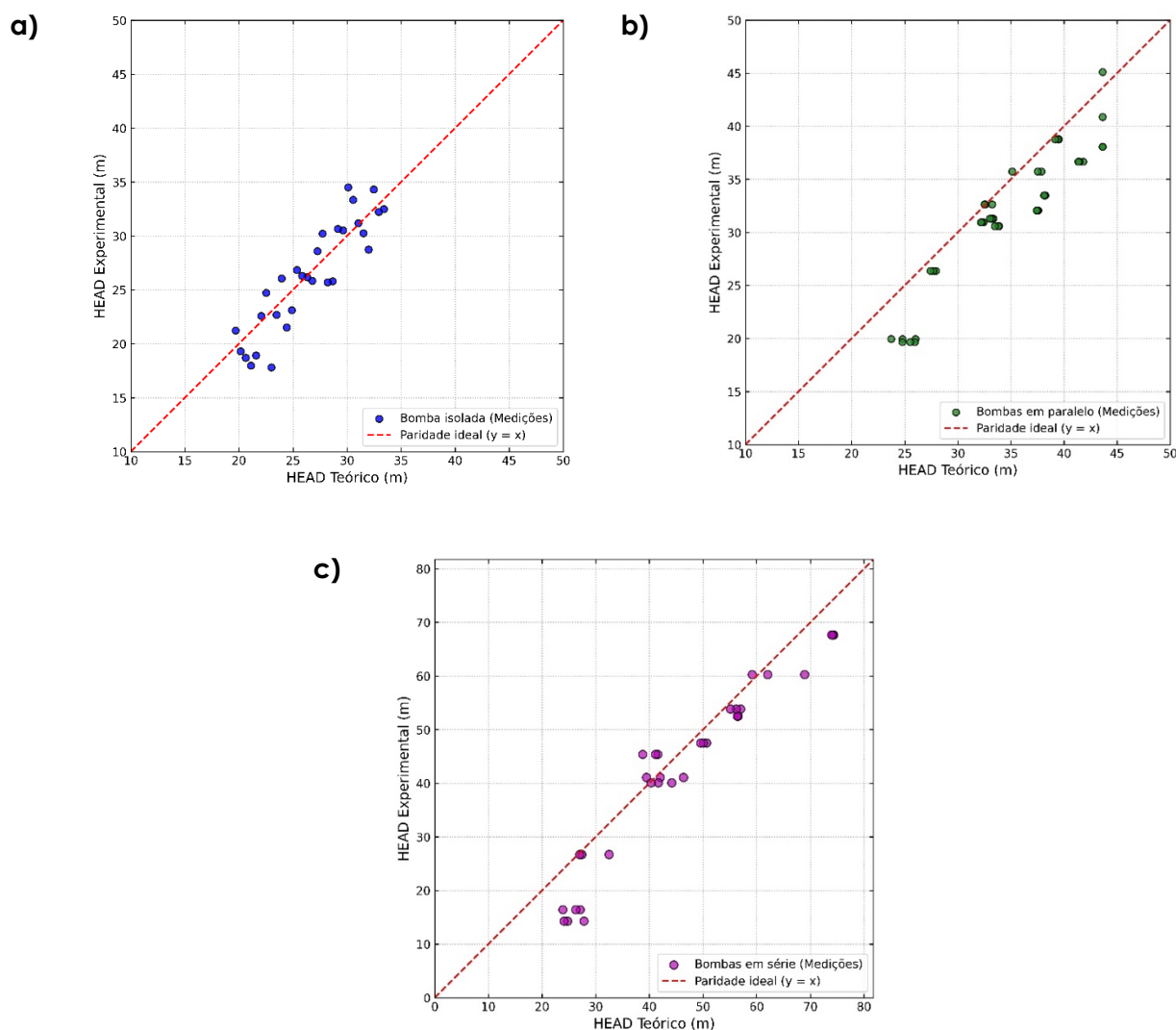
Percebe-se, para a bomba isolada, que a curva segue a tendência típica de comportamento decrescente do *HEAD* com o aumento da vazão. Os resultados experimentais apresentaram concordância com os dados do fabricante, com erro máximo de 22,50% com a raiz do erro quadrático médio igual a 1,75 m e desvio padrão de 1,34 m.

Para a associação de bombas em paralelo, notou-se o aumento esperado da vazão total para um mesmo *HEAD*. A curva experimental acompanha a tendência da curva teórica, apresentando erro máximo de 19,44%, sendo a raiz do erro quadrático médio igual a 3,10 m e desvio padrão de 0,78 m. Essa divergência pode ser atribuída a perdas por atrito adicionais no sistema de tubulações ou à existência de um leve desbalanceamento hidráulico entre as bombas do sistema.

Na configuração de bombas em série, os resultados demonstram o aumento significativo no *HEAD*, principalmente em vazões reduzidas. Observou-se uma maior dispersão nos pontos experimentais, apresentando um erro máximo de 37,15%, sendo a raiz do erro quadrático médio igual a 5,09 m e desvio padrão de 3,42 m em relação à curva teórica do fabricante.

A análise de paridade entre os valores experimentais e teóricos de *HEAD* foi realizada para três configurações de operações das bombas com intuito de avaliar a precisão dos resultados obtidos. Os gráficos obtidos foram registrados na Figura 6.

Figura 6 – Gráficos de paridade para as bombas nas seguintes configurações: isolada (a), em paralelo (b) e em série (c)



Fonte: elaborada pelos autores.

Para vazões maiores, que impactam em um menor valor de *HEAD*, há um maior desvio entre os valores experimentais e os teóricos, acompanhado de elevada dispersão nos dados. Assim, de forma consistente em todos os três arranjos analisados, verificou-se que os maiores desvios ocorreram nas condições de elevada vazão. Esse comportamento estimulou os discentes a investigar as diferenças entre os modelos teóricos e as condições reais do sistema.

A principal hipótese levantada esteve associada à presença de um trecho de mangueira flexível de 1/2" no sistema de sucção, que pode ter introduzido perdas



de carga adicionais, deformações geométricas e possíveis instabilidades no escoamento, fenômenos que não foram considerados nas curvas de referência fornecidas pelo fabricante. A partir dessa análise, discutiu-se a substituição da mangueira por uma tubulação rígida com maior diâmetro para evitar o estrangulamento, garantir a uniformidade da vazão e minimizar interferências nos dados experimentais.

Os desvios observados também permitiram discutir o impacto das simplificações adotadas na Eq. 9, especialmente em relação à desconsideração inicial da diferença de elevação (z) e das perdas de carga distribuídas e localizadas, evidenciando como variáveis físicas reais podem influenciar diretamente os resultados experimentais.

Além das limitações construtivas do módulo, as incertezas instrumentais associadas às medições de pressão e vazão também podem ter contribuído para a dispersão dos dados experimentais. Pequenas variações nas leituras dos manômetros e do vacuômetro propagam-se para o cálculo do HEAD, enquanto a determinação gravimétrica da vazão depende da precisão das medições de massa de água coletada e do tempo de coleta. Dessa forma, dentro da abordagem PjBL, todos esses motivos citados deixaram de representar apenas falhas experimentais e passaram a atuar como ferramentas de aprendizagem ativa, gerando conflito cognitivo necessário para que os discentes compreendessem os desafios de sistemas hidráulicos reais e as limitações de modelos teóricos simplificados.

A recorrência desses comportamentos ao longo das turmas que utilizaram o módulo entre os períodos de 2023.1 e 2025.2 reforça o potencial pedagógico dessa abordagem, evidenciando que as próprias limitações do protótipo podem contribuir para a integração dos conhecimentos teóricos e experimentais.

Em relação ao gráfico de paridade da bomba isolada, os pontos se distribuem bem próximos à reta bissetriz, indicando boa concordância com a curva teórica do fabricante. Para a configuração em paralelo, os pontos também se mantiveram próximos da reta de paridade, mas posicionaram-se majoritariamente abaixo desta reta, indicando a tendência de subestimar o *HEAD* em relação ao valor teórico. Por sua vez, a configuração em série apresentou maior dispersão entre os dados e uma distância mais pronunciada da linha de paridade, com uma grande parte dos valores abaixo da previsão teórica. Essa última configuração apresentou os maiores valores de erros, como evidenciado anteriormente.

A dispersão observada nos resultados também indica uma possibilidade de aprimoramento do módulo por meio da incorporação de sistemas digitais de



obtenção de dados, especialmente para a medição de vazão e pressão. Em sistemas inteligentes de monitoramento, sensores podem ser integrados a microcontroladores para registrar e transmitir informações automaticamente em intervalos predefinidos (Medeiros *et al.*, 2021).

Nesse sentido, sensores de fluxo do tipo turbina podem ser conectados à tubulação para medir o escoamento do líquido, emitindo pulsos elétricos convertidos em valores de vazão por meio da programação de microcontroladores. Castro *et al.* (2023) propuseram um sistema de monitoramento baseado em sensores digitais e transmissão dos dados para plataformas em nuvem, ampliando as possibilidades de acompanhamento remoto e automação. Caminha (2023) realizou a automação de uma bancada hidráulica para determinação da curva características de bomba centrífugas por meio de um microcontrolador Arduino como sistema de aquisição das variáveis fluidodinâmicas e o tratamento de dados.

Assim, o módulo didático de associação de bombas poderia ser aprimorado com a substituição ou complementação das leituras manuais de vazão por sensores digitais integrados a microcontroladores, possibilitando a obtenção automática dos dados experimentais e a construção digital das curvas características das bombas. Essa adaptação poderia reduzir incertezas associadas à leitura manual dos instrumentos, ampliar a rastreabilidade dos dados coletados e permitir que os estudantes aplicassem conceitos de instrumentação, programação e automação. Além disso, a integração com interfaces digitais, planilhas em nuvem ou sistemas Internet das Coisas (*IoT*) abriria caminho para o monitoramento em tempo real e, futuramente, para a adaptação do protótipo como laboratório remoto, alinhando a prática experimental aos princípios da Educação 4.0.

Avaliação da aplicação do módulo didático

Após a construção do módulo didático, este foi implementado na disciplina de Laboratório de Engenharia Química I do curso de graduação em Engenharia Química da FAT UERJ, a partir do ano de 2023, como uma das práticas relacionadas à associação de bombas. Foi aplicado um questionário voluntário, estruturado com questões em escala Likert, buscando avaliar a percepção dos estudantes quanto à contribuição do módulo para a compreensão dos conceitos de Mecânica dos Fluidos e para a integração entre teoria e prática.



A pesquisa foi conduzida com dois grupos de estudantes: discentes que utilizaram o módulo didático durante as atividades práticas da disciplina e discentes que cursaram a disciplina anteriormente à sua implementação. Ao todo, 26 estudantes participaram da pesquisa, sendo 19 (73,1%) pertencentes ao grupo que utilizou o módulo experimental e sete (26,9%) ao grupo que não teve contato com o sistema.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos junto aos estudantes que utilizaram o módulo didático. Observou-se uma percepção positiva em relação à atividade experimental, uma vez que as respostas se concentraram predominantemente nos níveis “Concordo” e “Concordo fortemente” da escala Likert, sem registros de respostas associadas aos níveis de discordância.

Tabela 3 – Distribuição percentual das respostas dos estudantes que utilizaram o módulo experimental, segundo a escala Likert (DF: Discordo fortemente; D: Discordo; I: Indiferente; C: Concordo; CF: Concordo fortemente)

Premissa avaliada	DF	D	I	C	CF
O módulo facilitou a compreensão dos conceitos estudados em sala de aula em relação a Associação de Bombas	0,0%	0,0%	0,0%	15,8%	84,2%
As atividades práticas auxiliaram na visualização dos fenômenos estudados.	0,0%	0,0%	0,0%	10,5%	89,5%
O módulo didático contribuiu para integrar teoria e prática.	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	94,7%
A utilização do sistema experimental tornou o aprendizado mais significativo.	0,0%	0,0%	0,0%	10,5%	89,5%
O uso do módulo aumentou meu interesse pela disciplina.	0,0%	0,0%	5,3%	10,5%	84,2%
As atividades contribuíram para o desenvolvimento da resolução de problemas.	0,0%	0,0%	5,3%	10,5%	84,2%
O módulo auxiliou na compreensão do comportamento do sistema durante os experimentos	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	94,7%
A experiência prática facilitou a compreensão do funcionamento das associações de bombas.	0,0%	0,0%	5,3%	5,3%	89,5%
O uso do módulo foi mais eficiente para aprendizagem do que apenas aulas teóricas.	0,0%	0,0%	5,3%	10,5%	84,2%



A ausência de atividades práticas dificultaria a compreensão do conteúdo.	0,0%	0,0%	10,5%	15,8%	73,7%
O módulo didático contribuiu para aumentar minha confiança na aplicação dos conceitos de engenharia.	0,0%	0,0%	0,0%	21,1%	78,9%

Fonte: elaborada pelos autores.

As maiores taxas de concordância forte foram observadas nas premissas relacionadas à integração entre teoria e prática e à compreensão do comportamento do sistema durante os experimentos, ambas com 94,7% das respostas em "Concordo fortemente". Resultados semelhantes também foram observados para as premissas relacionadas à visualização dos fenômenos estudados, à aprendizagem significativa e à compreensão do funcionamento das associações de bombas.

Os estudantes também reconheceram contribuições do módulo quanto ao desenvolvimento da resolução de problemas, ao aumento do interesse pela disciplina e à confiança na aplicação dos conceitos de Engenharia.

Em paralelo, os resultados relacionados aos discentes que não utilizaram o módulo experimental (Tabela 4) durante a realização da disciplina permitiram avaliar a percepção dos estudantes quanto às limitações do aprendizado exclusivamente teórico.

Tabela 4 – Distribuição percentual das respostas dos estudantes que não utilizaram o módulo experimental, segundo a escala Likert (DF: Discordo fortemente; D: Discordo; I: Indiferente; C: Concordo; CF: Concordo fortemente)

Premissa avaliada	DF	D	I	C	CF
Acredito que a utilização de um módulo experimental teria facilitado minha aprendizagem.	0,0%	0,0%	0,0%	28,6%	71,4%
Senti dificuldade em visualizar os conceitos abordados apenas teoricamente.	0,0%	28,6%	0,0%	14,3%	57,1%

Fonte: elaborada pelos autores.

Os resultados obtidos evidenciaram a importância da inserção de atividades práticas no ensino de Mecânica dos Fluidos. Observou-se que 71,4% dos participantes concordaram fortemente que a utilização de um módulo experimental teria facilitado a aprendizagem dos conteúdos abordados na



disciplina. Além disso, mais da metade dos estudantes (57,1%) relatou forte dificuldade em visualizar os conceitos apenas de forma teórica.

Esses resultados corroboram as respostas observadas entre os estudantes que utilizaram o módulo didático, os quais indicaram elevada percepção positiva quanto à integração entre teoria e prática, compreensão dos fenômenos hidráulicos e aprendizagem significativa proporcionada pelas atividades experimentais. Dessa forma, a comparação entre os grupos evidencia o potencial do módulo desenvolvido como ferramenta de apoio ao ensino experimental, contribuindo para aproximar os estudantes de situações reais de Engenharia e favorecer uma aprendizagem mais aplicada, participativa e contextualizada.

CONCLUSÕES

O projeto desenvolvido por meio de uma metodologia ativa com um grupo de alunos do curso de Engenharia Química resultou em um experimento didático simples, por meio do qual foi possível desenvolver habilidades como trabalho em equipe, aprendizagem autodirigida na realização das pesquisas necessárias para compor a parte teórica e criatividade na resolução dos problemas encontrados durante a execução do projeto, além da aprendizagem significativa da base teórica. Os desafios encontrados durante a execução do projeto estão de acordo com os princípios da Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL), contribuindo para o desenvolvimento de habilidades técnicas e analíticas essenciais à formação do engenheiro químico.

A prática experimental permitiu não apenas visualizar os diferentes tipos de associação de bombas e suas influências sobre as curvas características do sistema, mas também compreender a importância de uma análise criteriosa das condições operacionais e das limitações físicas envolvidas no projeto de sistemas de bombeamento. Essa aproximação entre teoria e situações reais de Engenharia foi refletida também na percepção dos estudantes, cujos resultados evidenciaram elevada aceitação do módulo didático, destacando contribuições relacionadas à integração entre teoria e prática, à compreensão dos fenômenos hidráulicos e à aprendizagem significativa dos conceitos abordados em Mecânica dos Fluidos. Além disso, a comparação entre os grupos que utilizaram e os que não utilizaram o módulo didático reforçou a importância das atividades experimentais como ferramenta de apoio ao Ensino de Engenharia.



Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprimoramento construtivo do protótipo, como, por exemplo, por meio da substituição dos trechos de maior restrição hidráulica por tubulações rígidas e de maior diâmetro, a fim de reduzir perdas de carga e melhorar a estabilidade do escoamento. Além disso, a incorporação de sensores digitais de vazão e pressão, integrados a microcontroladores como Arduino, NodeMCU ou ESP32, poderia permitir a obtenção automática dos dados experimentais e, posteriormente, a construção digital das curvas características das bombas. Essa alteração reduziria a dependência de leituras manuais e ampliaria a precisão e a rastreabilidade dos dados, além de possibilitar a inserção de conteúdos relacionados à instrumentação, programação e automação no ensino de conceitos de Mecânica dos Fluidos abordados na disciplina de Laboratório de Engenharia Química I.

A integração do sistema com interfaces digitais, planilhas em nuvem ou plataformas IoT também poderia viabilizar o monitoramento em tempo real e a adaptação do módulo didático para atividades de laboratório remoto, ampliando seu potencial como ferramenta didática para o Ensino de Engenharia.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019**. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, seção 1, 2019.
- CAMINHA, L. D. B. **Automação da bancada de Mecânica dos Fluidos para obtenção da curva característica da bomba**. 2023. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2023.
- CASTRO, J. F. *et al.* Projeto de um sistema de monitoramento de vazão de água utilizando redes LoRa em comunidades isoladas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.]: ABRHidro, 2023.
- CASTRO, R. N. A. Teorias do currículo e suas repercussões nas diretrizes curriculares dos cursos de Engenharia. **Educativa – Revista de Educação**, v. 13, n. 2, p. 307-322, 2010.
- CUNHA, A. P. Tecnologias digitais emergentes no Ensino de Engenharia: potencial pedagógico para aprendizagem ativa e desenvolvimento de competências. **ARACÊ**, [S. l.], v. 7, n. 12, e11305, 2025.
- DAMASCENO, A. Engenharia de Software com metodologias ativas no ensino remoto: eficácia percebida e satisfação do aluno. **Anais do Workshop de Informática na Escola (WIE)**, 2022.
- FERRARINI, R.; SAHEB, D.; TORRES, P. L. Metodologias ativas e tecnologias digitais: aproximações e distinções. **Revista Educação em Questão**, v. 57, n. 52, 2019.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.



- GODOI, V. *et al.* Aprendizagem baseada em projetos por meio de textos de divulgação científica. **Argumentos Pró-Educação**, v. 5, 2020.
- KOLB, D. A. **Experiential learning: experience as the source of learning and development**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.
- LANDAVERDE-ALVARADO, C. J. Problem-based learning (PBL) and project-based learning (PjBL) in a continuously improving chemical engineering laboratory experience. **Chemical Engineering Education**, v. 58, n. 2, p. 120-124, 2024.
- MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- MEDEIROS, E. L.; NETO, A. M. L. Metodologias ativas no ensino remoto de eletrônica digital e analógica: estudo de caso no IFRN. **Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica**, v. 3, n. 24, e14282, 2024.
- MEDEIROS, L. E. L. *et al.* Desenvolvimento de um protótipo inteligente utilizando sensor turbina para detecção de vazamentos em edificações. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 11, p. 126-134, 2021.
- NETO, A. R.; FIORIN, M. Uma análise da interrelação entre Indústria 4.0, Educação 4.0 e Engenharia, e suas influências na perspectiva de crescimento econômico do Brasil no século XXI. **CPITT – Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia**, v. 3, n. 1, 2021.
- PUNCREOBUTR, V. Education 4.0: new challenge of learning. **St. Theresa Journal of Humanities and Social Sciences**, v. 38, n. 10, p. 1064-1069, 2016.
- RUSLAN, M. S. H. *et al.* Integrated project-based learning (IPBL) implementation for first year chemical engineering student: DIY hydraulic jack project. **Education for Chemical Engineers**, v. 35, p. 54-62, 2021.
- TEIXEIRA, R. L. P.; SILVA, P. C. D.; BRITO, M. L. de A. Aplicabilidade de metodologias ativas de aprendizagem baseada em problemas em cursos de graduação em Engenharia. **Humanidades & Inovação**, v. 6, n. 8, p. 138-147, 2019.