



# **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PPGESA**

## **LABORATÓRIO VIRTUAL DE BOMBAS HIDRÁULICAS APLICADO AO APRENDIZADO DE HIDRÁULICA APLICADA AO SANEAMENTO**

**DISCENTE: YARA CRISTIANE FONSECA SANTOS  
ORIENTADOR PROF.DR MANOEL JOSÉ DOS SANTOS SENA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**



**BELÉM (2024)**

Yara Cristiane Fonseca Santos

## Laboratório virtual de bombas hidráulicas aplicado ao aprendizado de Hidráulica Aplicada ao Saneamento

Defesa de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – PPGESA, da Universidade Federal do Pará – UFPA, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental. Linha de Pesquisa: Planejamento, Monitoramento, Operação e Controle de Sistemas de Saneamento

DATA DA AVALIAÇÃO: 07/05/2024

APROVADO EM: 07/05/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **MANOEL JOSE DOS SANTOS SENA**  
Data: 07/05/2024 20:32:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Manoel José dos Santos Sena  
Orientador - PPGESA/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **GIOVANNI CHAVES PENNER**  
Data: 08/05/2024 09:52:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner  
Membro - PPGESA/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **KATIUCIA NASCIMENTO ADAM**  
Data: 08/05/2024 10:17:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dra. Katiucia Nascimento Adam  
Membro - PPGESA/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **LEONARDO ARAUJO NEVES**  
Data: 08/05/2024 12:51:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. M.Sc. Leonardo Araújo Neves  
Avaliador Externo - CESUPA



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S2371 Santos, Yara Cristiane Fonseca.  
Laboratório virtual de bombas hidráulicas aplicado ao  
aprendizado de Hidráulica Aplicada ao Saneamento / Yara  
Cristiane Fonseca Santos. — 2024.  
68 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Manoel José dos Santos Sena  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental, Belém, 2024.

1. Bombas. 2. Hidráulica. 3. Laboratórios. I. Título.

CDD 627

## Agradecimentos

À Deus que em sua infinita sabedoria e misericórdia me deu forças por madrugadas, dias e noites para continuar a jornada.

À minha mãe, a maior guerreira da minha vida, que sempre foi espelho de persistência e determinação, e que sempre me incentivou a buscar conhecimento em todas as fases da vida.

Ao meu pai, cujas palavras de apoio e ensinamento me fortaleceram e me ajudaram a amadurecer ao longo da vida.

As minhas irmãs, por estarem sempre ao meu lado, e que me apoia em tudo o que eu preciso, e agora principalmente pelo amor dedicado à minha filha.

Manuella, que em sua inocência me inspira a ser melhor todos os dias, não só como mãe, mas como mulher e profissional.

Ao meu orientador, professor Manoel Sena, pela atenção, compreensão, empatia, ser humano incrível, valiosos ensinamentos e por estar sempre disposto a ensinar, sem você este trabalho não seria possível.

A banca examinadora pelas valiosas contribuições na ocasião da defesa de qualificação.

Minha mais sincera gratidão!

## Lista de Ilustrações

Figura 1 - Componentes do circuito .....	14
Figura 2 - GUI em um PC .....	18
Figura 3 - GUI em um smartphone .....	18
Figura 4 - GUI em um tablet .....	19
Figura 5 - Resultados de uma combinação de parâmetros de entrada - Alta eficiência .....	20
Figura 6 - Resultados de uma combinação de parâmetros de entrada - Baixa eficiência ....	20
Figura 7 - Classificação de 1 a 10 das perguntas feitas na pesquisa.....	21



## Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultado da pesquisa.....	21
---------------------------------------	----



## Lista de abreviaturas e siglas

FACOMP	Faculdade de Computação
ICEN	Instituto de Tecnologia
PPGCC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFPA	Universidade Federal do Pará
GUI	Graphical User Interface

## Lista de Símbolos

H	Altura
L	Comprimento
Q	Vazão
$H_{\text{bomba}}$	Altura manométrica da bomba
$H_{\text{sistema}}$	Altura manométrica do sistema
g	Aceleração devida à gravidade
$f_s$	Fator de atrito na tubulação de sucção
$f_r$	Fator de atrito na tubulação de recalque
$f_t$	Fator de atrito na tubulação do tanque de descarga
$Q_s$	Vazão na tubulação de sucção
$Q_r$	Vazão na tubulação de recalque
$Q_t$	Vazão na tubulação do tanque de descarga
$\rho$	Massa específica do fluido
$\nu$	Viscosidade do fluido
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta da tubulação
c.m.p.	Coefficiente de majoração das perdas
H0	Desnível geométrico entre os dois tanques
$D_s$	Diâmetro da tubulação de sucção
$D_r$	Diâmetro da tubulação de recalque
$D_t$	Diâmetro da tubulação do tanque de descarga
$L_{eqs}$	Comprimento equivalente da tubulação de sucção
$L_{eqr}$	Comprimento equivalente da tubulação de recalque
$L_{eqt}$	Comprimento equivalente da tubulação do tanque de descarga

## LABORATÓRIO VIRTUAL DE BOMBAS HIDRÁULICAS APLICADO AO APRENDIZADO DE HIDRÁULICA APLICADA AO SANEAMENTO

### VIRTUAL LABORATORY OF HYDRAULIC PUMPS APPLIED TO THE LEARNING OF APPLIED HYDRAULICS IN SANITATION.

Yara Cristiane Fonseca Santos <sup>1</sup>  
Dr. Manoel José dos Santos Sena <sup>2</sup>

#### Abstract

*The curves that characterize the behavior of a pumping system are usually studied in physical laboratories. However, there are limitations regarding the parameters that are usually varied in such conditions. The use of virtual laboratories can expand the experiments conducted in physical laboratories in such a way that a better understanding of the effect of varying the parameters can occur. Examples of such parameters include length, pipe diameter, pipe material roughness, fluid viscosity, and the height difference between the lower and upper tanks. In this paper, the development of a responsive design virtual laboratory for a pumping system is described. This virtual laboratory can be used on PC computers, tablets, or smartphones due to its responsive graphical user interface. The equations used to simulate the behavior of the laboratory are the conservation equations, considering the equality between the manometric head provided by the pump and the pressure drop observed in the system. To account for pressure drops, the Darcy-Weisbach equations are used, with friction coefficients defined from the Colebrooke-White equations. The conservation equations are then solved numerically using the bisection method. The results are displayed graphically in the virtual laboratory. These results are the pump head, pressure losses, efficiency and driving power. All of them are as a function of the flow rate. The operating point is calculated and presented graphically. The variables are changed using sliders. The laboratory was tested with students of a Civil Engineering course. The results of a survey conducted with these students showed the effectiveness of the laboratory in promoting a greater understanding of the concepts studied. Most of the survey participants stated that they had greater knowledge of the pump curve, the system pressure loss curve, the pump efficiency curve and the pump driving power curve. This showed the usefulness of plotting these quantities as a function of the flow rate. A greater understanding of the influence of parameter variations was also perceived by the analysis of the survey results. In addition, the tests indicate directions for future developments.*

**Key Words:** Virtual Laboratory. Hydraulic Pump. Responsive. Interface Design.

---

<sup>1</sup> Discente na Universidade Federal do Pará (UFPA), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA), Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental.

<sup>2</sup> Professor Dr. na Universidade Federal do Pará (UFPA), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA), Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental.

## Resumo

As curvas que caracterizam o comportamento de um sistema de bombeamento são normalmente estudadas em laboratórios físicos. No entanto, existem limitações quanto aos parâmetros que geralmente são variados em tais condições. O uso de laboratórios virtuais pode expandir os experimentos conduzidos em laboratórios físicos de tal forma que uma melhor compreensão do efeito da variação dos parâmetros possa ocorrer. Exemplos de tais parâmetros incluem comprimento, diâmetro do tubo, rugosidade do material do tubo, viscosidade do fluido e a diferença de altura entre os tanques inferior e superior. Neste trabalho, é descrito o desenvolvimento de um laboratório virtual de design responsivo para um sistema de bombeamento. Este laboratório virtual pode ser usado em computadores PC, tablets ou smartphones devido à sua interface gráfica de usuário responsiva. As equações usadas para simular o comportamento do laboratório são as equações de conservação, considerando a igualdade entre a altura manométrica fornecida pela bomba e a perda de carga observada no sistema. Para a contabilização das perdas de carga, são utilizadas as equações de Darcy-Weisbach, com coeficientes de atrito definidos a partir das equações de Colebrooke-White. As equações de conservação são então resolvidas numericamente usando o método da bissecção. Os resultados são exibidos em forma gráfica no laboratório virtual. Esses resultados são a altura manométrica da bomba, as perdas de carga, a eficiência e a potência motriz. Todos eles em função da vazão. O ponto de operação é calculado e apresentado graficamente. As variáveis são alteradas usando controles deslizantes. O laboratório foi testado com alunos de um curso de Engenharia Civil. Os resultados de uma pesquisa realizada com esses alunos mostraram a eficácia do laboratório em promover uma maior compreensão dos conceitos estudados. A maioria dos participantes da pesquisa declarou ter maior conhecimento sobre a curva da bomba, a curva de perda de carga do sistema, a curva de eficiência da bomba e a curva de potência motriz da bomba. Isso mostrou a utilidade de plotar essas quantidades em função da vazão. Um maior conhecimento da influência das variações dos parâmetros também foi percebido pela análise dos resultados da pesquisa. Além disso, os testes indicam direções para desenvolvimentos futuros.

**Palavras-chave:** Laboratório Virtual. Bomba Hidráulica. Responsivo. Design de Interface.

## 1 - Introdução

Bombas hidráulicas são parte integrante da maioria das instalações industriais. As atividades de bombeamento são responsáveis por grande parte dos custos energéticos nos processos produtivos. Por esse motivo, os cursos de engenharia frequentemente abordam vários aspectos do comportamento e seleção de bombas hidráulicas. Nesse contexto, as atividades laboratoriais auxiliam muito na compreensão dos fenômenos que ocorrem no acoplamento entre a bomba e o sistema, que define o ponto de operação. Laboratórios físicos para sistemas de bombeamento envolvem estruturas que não permitem a variação de muitos parâmetros, principalmente aqueles relacionados às características do sistema, como comprimento e diâmetro da tubulação, altura do tanque ou fluido bombeado. Quando isso é possível, a variação geralmente é limitada em amplitude. Portanto, laboratórios virtuais, nos quais há mais liberdade para variação de parâmetros, tornam-se uma alternativa para atividades complementares às realizadas em laboratórios físicos.

Neste estudo, foi desenvolvido um laboratório virtual por meio do qual os alunos podem realizar atividades para aprimorar seus conhecimentos sobre o comportamento de sistemas de bombas. O laboratório possui design responsivo, características multiplataforma, interface gráfica de usuário (GUI) que caracteriza o ponto de operação, a curva da bomba, a curva de perda de carga do sistema, a curva de potência e a curva de eficiência. As características responsivas da interface do laboratório permitem que ela seja usada em computadores desktop, tablets ou smartphones. O laboratório também tinha o requisito de ser acessível pela internet usando os padrões HTML5.

Uma das primeiras aplicações de programas de computador de experimentos de laboratório virtual visando o aprendizado na área de engenharia foi publicada por Gosman et al (1976). Neste caso, a aplicação do laboratório foi em um curso sobre mecânica de fluidos e transferência de calor ministrado a alunos seniores de engenharia mecânica no Imperial College de Londres. As atividades de computação envolveram a simulação de fluxos e transferência de calor em geometrias bidimensionais. Os valores de incógnitas como velocidades e temperaturas foram impressos em pontos específicos da geometria, e os alunos desenharam à mão as isolinhas definidas pelas variáveis. Os alunos viram pontos positivos e negativos na atividade. Entre os pontos positivos estavam o engajamento proporcionado pela atividade, bem como o desenvolvimento do trabalho em equipe na interpretação dos resultados. Entre os negativos estavam a dificuldade em lidar com uma grande quantidade de resultados em forma de números e o trabalho necessário para transformá-los em resultados significativos.

Diversas formas de melhorar o processo de ensino-aprendizagem se popularizaram nos últimos anos. Entre elas, podemos citar a educação baseada em resultados (Zamir et al (2022)). O método envolve a resolução de problemas pelos alunos. Uma das etapas desse processo envolve a aplicação dos conhecimentos adquiridos por meio de atividades práticas. Essas atividades podem consistir, em sua fase inicial, em experimentos laboratoriais.

Durante a pandemia do coronavírus, os laboratórios virtuais ganharam destaque, o que ficou evidente com a possibilidade que criaram para o trabalho a distância e em grupo, como demonstrado por Vasiliadou (2020). Os laboratórios virtuais também mostraram capacidade de aprendizagem baseada em cenários e investigação.

Gordillo et al (2022) mostraram que a aprendizagem baseada em jogos é mais eficaz do que a aprendizagem baseada em vídeos. Essa percepção é válida tanto na aquisição de conhecimento pelos alunos quanto na motivação para os estudos. Como os jogos têm em comum com os laboratórios virtuais o fato de o aluno aprender de forma autônoma e ativa, podemos inferir que, pelo menos em parte, os laboratórios também contribuem para uma aprendizagem e motivação mais efetivas.

A aplicação de treinamento intensivo em tecnologia com o objetivo de familiarizar os alunos com ferramentas digitais feita por Torbaghan et al (2023) demonstra que, quando os alunos conhecem tecnologias como realidade virtual e aumentada, eles são motivados a continuar usando tecnologias voltadas para a aprendizagem.

Zhao et al (2022) realizaram uma pesquisa sobre os resultados obtidos com a aplicação de jogos de computador na aprendizagem de programação. Tipos de dados e loops de repetição foram abordados. Os resultados de questionários de avaliação após um grupo de alunos em diversas instituições utilizarem os jogos mostraram que aspectos da localização das pessoas e seu nível de conhecimento básico influenciaram na aprendizagem demonstrada. A utilização de laboratórios virtuais aliados a laboratórios físicos e remotos é uma abordagem efetiva, conforme descrito no trabalho de Tzafestas et al (2006), com foco na aprendizagem na área de robótica. Uma das conclusões deste trabalho foi que os laboratórios virtuais proporcionaram um nível

mais alto de desenvolvimento de conhecimento no grupo de estudo, especialmente para o desenvolvimento de habilidades de alto nível.

Ezika et al (2023) conduziram uma avaliação do impacto na aprendizagem de currículos de cursos de engenharia que não enfatizam adequadamente um número significativo de atividades práticas ao longo da semana. Há uma relação significativa entre a porcentagem de tempo dedicada no currículo às atividades práticas e o nível de habilidades desenvolvidas pelos alunos, medido pela percepção das empresas que os contratam após a graduação.

O uso de laboratórios virtuais no ensino de engenharia começou a se popularizar nos anos 2000. Casals-Torrens (2013), por exemplo, descreve um conjunto de laboratórios virtuais na área de motores elétricos. As interfaces gráficas eram baseadas no desempenho dos equipamentos. A aplicação de laboratórios virtuais em sala de aula demonstrou que eles eram uma boa opção para complementar os resultados de aprendizagem obtidos em laboratórios físicos, não com a intenção de substituí-los. Outro exemplo desse tipo de aplicação é um laboratório virtual de física voltado para o aprendizado sobre radiação gama desenvolvido por Tlaczala et al (2008). Segundo esse estudo, um dos benefícios do uso de laboratórios virtuais é que ele pode familiarizar futuros usuários com equipamentos utilizados em ensaios reais.

Hoje, o uso de laboratórios virtuais em cursos de física, por exemplo, é acessível a qualquer instituição. Isso se deve à disponibilidade de ferramentas como as simulações do projeto PHET, conforme descrito no trabalho de Alsharif (2021). Quando utilizadas em cursos de física, este estudo mostrou que essas simulações são responsáveis por aumentar a compreensão da teoria e dos conceitos físicos envolvidos nas disciplinas estudadas. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho desenvolvido por Gunawan et al (2018).

Hamed e Aljanazrah (2020) mostraram que o uso de laboratórios virtuais na etapa de treinamento introdutório de alunos que realizarão atividades práticas em laboratórios físicos é útil. Isso acontece porque, ao realizar experimentos físicos, os alunos ficam atentos a pontos importantes das práticas, que já são verificados durante os experimentos virtuais, antes da execução dos reais.

O trabalho de Nolen e Koretsky (2018) mostrou que o nível de engajamento dos alunos é maior ao utilizar laboratórios virtuais do que ao utilizar laboratórios físicos. No caso do estudo deles, os laboratórios de química envolveram, em sua versão física, restrições associadas à segurança e ao tempo disponível para a realização dos experimentos. O estudo concluiu que talvez esses aspectos tenham sido a principal causa do maior engajamento com o uso de laboratórios virtuais.

Ramirez-Romero e Rivera-Rodríguez (2018) descrevem um laboratório virtual de motores de indução. Esse laboratório é construído em um ambiente 3D e tem como foco a experiência do usuário. Em uma instituição onde foi testado, houve aumento no número de alunos aprovados, bem como maior eficiência nas atividades desenvolvidas em laboratórios físicos. Essa maior eficiência ocorreu com menos erros que causaram a indisponibilidade de equipamentos de laboratório físico.

Lei et al (2018) mostraram que trabalhos direcionados a técnicas de acesso a laboratórios virtuais via internet e modelagem de procedimentos práticos, como montagem e conexão de componentes, são capazes de aumentar a qualidade do aprendizado. No caso do estudo, a conexão de cabos elétricos em circuitos de controle é o foco da simulação.

A meta-análise desenvolvida por Hillmayr et al (2020) mostrou que o uso da tecnologia no aprendizado de ciências para alunos de vários níveis demonstrou melhorar os resultados da aprendizagem. Também foi constatado que os resultados são ainda melhores quando os

professores recebem treinamento adequado para o uso da tecnologia. Também foi notado que o uso de sistemas de tutoria inteligente e simuladores foi mais eficaz do que o uso de sistemas limitados a conteúdo hipermedia.

Wen et al (2020) desenvolveram uma série de laboratórios virtuais integrados a um ambiente que permite que os alunos sejam questionados sobre aspectos específicos dos experimentos. Além disso, neste sistema, os alunos também são solicitados a desenvolver hipóteses sobre os resultados obtidos com as simulações. Os resultados mostraram que as atividades de simulação usando laboratórios virtuais tiveram um impacto significativo e de longo prazo no conhecimento científico dos alunos.

Uma análise bibliométrica sobre o tópico de laboratórios virtuais e remotos até o ano de 2015 é fornecida por Heradio et al (2016). Esta análise é especialmente útil para aqueles interessados em pesquisar a evolução do tópico ao longo do tempo.

Gui et al (2023) conduziram uma pesquisa com vários alunos focada na educação para o uso adequado de mídia digital por meio de smartphones. Foi descoberto que, uma vez que receberam treinamento adequado, os jovens mostraram uma diminuição significativa no uso generalizado e problemático de smartphones. A pesquisa também observou um aumento no bem-estar dos jovens por meio do uso da tecnologia e do treinamento que receberam. Esses resultados mostram que as políticas que envolvem educação para o uso eficaz das tecnologias são uma estratégia válida para tornar o uso educacional de smartphones mais eficaz entre os jovens.

Uma estratégia de arquitetura de desenvolvimento de laboratório virtual não usual é chamada de sistemas participativos. Nesse tipo de sistema, os usuários não alteram os parâmetros que controlam a simulação. Em vez disso, eles controlam entidades que participam ativamente da simulação. Langbeheim e Levy (2019) mostram como esse conceito é aplicado em um laboratório virtual para o estudo do movimento de partículas. Nesse caso, o usuário controla o movimento de uma das partículas. O estudo mostra que esse tipo de abordagem leva a ganhos significativos de aprendizagem.

Os sistemas de tutoria automatizados de inteligência artificial foram aplicados com sucesso a atividades como aprendizagem de programação de computadores. O uso concomitante de atividades lúdicas, como jogos (Hooshyar et al (2016)) é um aspecto que resulta no aumento do engajamento dos alunos.

Post et al (2019) conduziram uma revisão de literatura sobre os resultados obtidos com laboratórios remotos. A pesquisa mostrou que, em geral, os alunos obtêm melhoria do conhecimento conceitual e demonstram engajamento e satisfação com o uso dos laboratórios. Por outro lado, o processo de avaliação da aprendizagem ainda precisa ser melhor estudado e compreendido.

Chen et al (2020) conduziram uma extensa revisão de literatura sobre tendências no uso de tecnologias de aprendizagem ao longo de 40 anos. Fica evidente nesta análise como a aprendizagem mediada por tecnologia se desenvolveu rapidamente nas últimas décadas.

Boyle et al (2016) conduziram uma revisão de literatura sobre a aplicação de jogos e serious games na aprendizagem. A área da Saúde é a que mais tem sido pesquisada em serious games. Estudos futuros ainda precisam ser desenvolvidos para identificar as principais características dos jogos que contribuem para a eficácia da aprendizagem. Assim, uma nova geração de ferramentas computacionais com esta finalidade específica pode ser desenvolvida.

A simulação computacional de bombas é um procedimento amplamente utilizado na indústria para o desenvolvimento de vários equipamentos. Por exemplo, no trabalho de Qu et al (2019), simulação computacional e testes de bancada foram usados para desenvolver uma bomba para um sistema de transmissão variável contínua. Nesta aplicação, foi utilizada uma bomba de deslocamento positivo. Algoritmos de controle de pressão foram desenvolvidos em pontos específicos do circuito hidráulico para que a eficiência do sistema pudesse ser melhorada.

Lima et al (2012) desenvolveram um laboratório virtual usando a tecnologia Flash. O laboratório foi utilizado em um instituto de engenharia no Brasil e possuía uma interface dividida em três abas. Essas abas continham gráficos de desempenho, equações utilizadas e parâmetros de trabalho como altura manométrica total, consumo de energia e eficiência. Essa versão incluía uma interface gráfica não responsiva, além de apresentar limitações para uso em dispositivos móveis.

Nedeljkovic et al (2018) desenvolveram um equipamento de teste físico que demonstra diversos aspectos de um sistema de bombeamento: a equação de Bernoulli, a equação de Euler, perdas hidráulicas e medidores de vazão. Junto com a bancada física, foram desenvolvidos aplicativos Labview para associações de bombas paralelas e em série. Esses aplicativos permitiram a expansão dos experimentos conduzidos na configuração física.

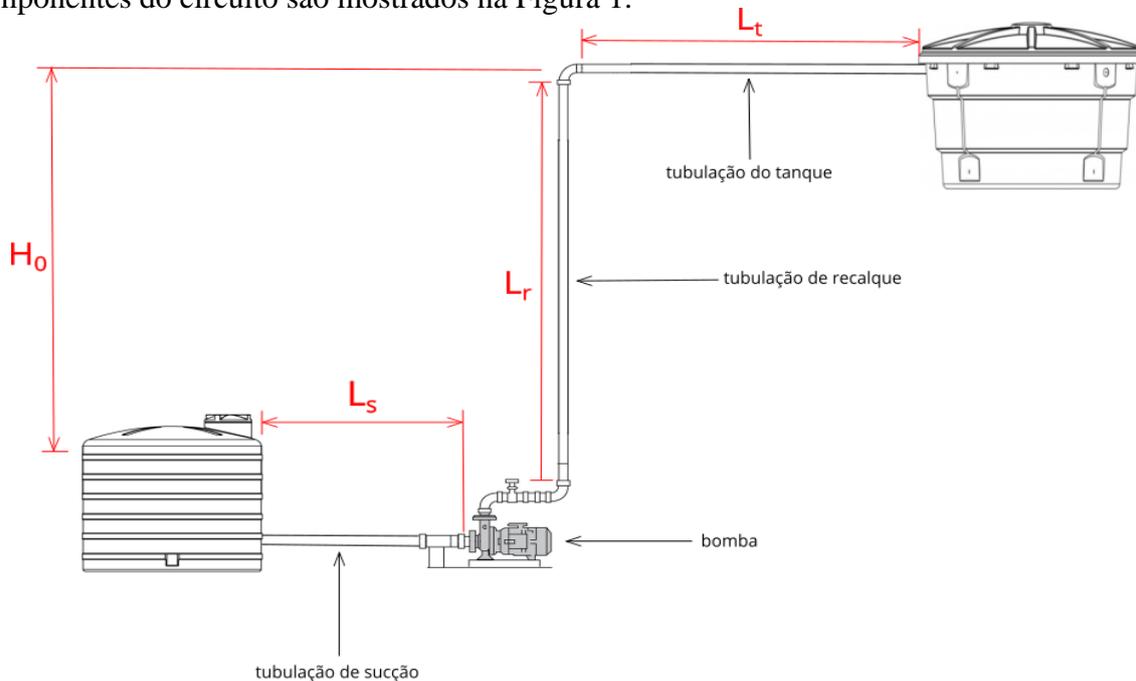
Kim e Jeong (2017) construíram uma configuração experimental para verificar a aplicabilidade de medidores de vazão virtuais em um sistema de bombeamento de ar-condicionado. O sistema de bombeamento precisava ser simulado por meio de equações de similaridade. O principal objetivo da pesquisa era comprovar o uso de um sensor de baixo custo como método eficaz para medição de vazão. Mas as simulações utilizadas têm potencial para serem aplicadas como um laboratório virtual na área de bombas hidráulicas. O treinamento sobre o uso de bombas de infusão na área de educação em enfermagem pode ser realizado por laboratórios virtuais, como mostra o trabalho de Bowtell et al (2012). Nesta aplicação, as tecnologias de acesso remoto permitiram que os alunos de enfermagem desenvolvessem suas habilidades como motoristas de bombas de infusão intravenosa. Foi identificado neste trabalho que a contextualização foi um fator-chave no sucesso da tecnologia no processo de aprendizagem.

A pandemia da COVID-19 criou a necessidade de os alunos realizarem experimentos de laboratório em suas casas. Com isso em mente, Bassegio et al (2022) desenvolveram um laboratório virtual de bombas escrito em Python para auxiliar os alunos no desenvolvimento de atividades práticas sobre o tema variação de velocidade em bombas. O laboratório conta com um assistente virtual para auxiliar os alunos a realizarem as tarefas.

## 2 - Metodologia

### 2.1 - Interface

O circuito de fluxo foi projetado para descrever uma instalação simples, incluindo um tanque superior, um tanque inferior, tubulações de sucção, descarga e tanque, e a bomba. Esses componentes do circuito são mostrados na Figura 1.



**Figura 1 - Componentes do circuito**

Os parâmetros que podem ser alterados para verificar as relações de causa e efeito são:

- Comprimentos de tubulação - o usuário pode alterar individualmente os comprimentos das tubulações de sucção, descarga e tanque;
- Diâmetros de tubulação - o usuário pode alterar individualmente os diâmetros das tubulações de sucção, descarga e tanque;
- Rugosidade da tubulação - o usuário pode alterar a rugosidade das tubulações;
- Viscosidade - o usuário pode alterar a viscosidade cinemática do fluido bombeado;
- Densidade - o usuário pode alterar a densidade do fluido bombeado;
- Diferença de altura entre os tanques - a posição relativa entre os tanques inferior e superior pode ser alterada.

A interface gráfica do usuário foi definida para oferecer, de forma simples, acesso a cinco tipos de gráficos de linha:

- A variação da altura manométrica da bomba com a vazão;
- A variação da perda de carga do sistema com a vazão;
- A variação da potência consumida pela bomba com a vazão;
- A variação da eficiência da bomba com a vazão.

Todos os quatro gráficos incluem a identificação do ponto de operação por meio de um ponto verde sobre as linhas do gráfico.

Esta interface foi desenvolvida usando o padrão HTML5 e a linguagem de programação Javascript. Esta tecnologia torna o laboratório adequado para dispositivos móveis.

A configuração da interface permite que o aluno verifique como a mudança de cada parâmetro influencia o comportamento do sistema. Os controles da interface são definidos como controles deslizantes. Isso limita os valores a serem inseridos a um determinado intervalo, mas, por outro lado, facilita o uso em smartphones.

Também há resultados de simulação em formato de texto para a descrição do ponto de operação: descarga de fluido, altura da bomba, eficiência, potência, velocidades da tubulação, descargas da tubulação e perdas de carga nas tubulações de sucção, descarga e tanque.

No caso de uso em um PC ou tablet, com uma proporção de tela de 16:9 ou similar, os gráficos e controles deslizantes sempre estariam visíveis na tela. No caso de uso em um dispositivo móvel, como tablet ou smartphone, os gráficos devem estar disponíveis por meio de rolagem, e os controles deslizantes devem ser acessíveis por meio de um botão auxiliar que leve a um menu retrátil.

## 2.2 - Modelagem da bomba e do sistema

A modelagem adotada neste trabalho é baseada no trabalho de Mesquita et al (2006). No ponto de operação do sistema, a altura manométrica fornecida pela bomba,  $H_{pump}$ , deve ser igual à altura manométrica solicitada pelo sistema,  $H_{system}$ , para transportar o fluido. Na altura  $H_{system}$ , são consideradas as perdas nas tubulações, bem como a energia que o fluido terá ao final do transporte. Esta condição é estabelecida na equação 1.

$$H_{bomba} = H_{sistema} \quad \text{(Equação 1)}$$

Analisando a Figura 1, é possível observar que há apenas um tubo saindo do tanque de sucção, passando pela bomba e indo para o tanque superior. Se for considerado o regime permanente, as vazões no tubo de sucção,  $Q_s$ , no tubo de descarga,  $Q_r$ , e no tubo do tanque superior,  $Q_t$ , são iguais à vazão  $Q$ . Isso é traduzido pela equação 2.

$$Q_s = Q_r = Q_t = Q \quad \text{(Equação 2)}$$

A altura manométrica da bomba é uma característica da bomba e é obtida através da curva da bomba, fornecida pelo fabricante. No laboratório virtual, a equação 3 da curva da bomba a ser usada nas simulações é calculada a partir dos dados do fabricante através de um processo de interpolação usando o método dos mínimos quadrados, para obter os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Assim, qualquer bomba pode ser usada no laboratório virtual, desde que sua curva de desempenho esteja disponível.

$$H_{bomba} = a + bQ + cQ^2 \quad \text{(Equação 3)}$$

A altura manométrica do sistema é uma característica da instalação. É a energia que precisa ser fornecida ao fluido para que ele seja transferido do tanque inferior para o tanque superior. Essa

energia corresponde à diferença de altura entre os tanques, somada à energia que é perdida no transporte devido às perdas nas tubulações. A equação 4 é usada para quantificar a altura manométrica do sistema. Nessa equação,  $H_0$  é a diferença de altura entre os tanques inferior e superior,  $H_s$  é a altura manométrica perdida pelo fluido ao percorrer a tubulação de sucção,  $H_r$  é a altura manométrica perdida pelo fluido ao percorrer a tubulação de descarga e  $H_t$  é a altura manométrica perdida pelo fluido ao percorrer a tubulação do tanque superior.

$$H_{sistema} = H_0 + H_s + H_r + H_t \quad \text{(Equação 4)}$$

As alturas manométricas referentes a cada seção do tubo são calculadas pelas equações de Darcy-Weisbach:

$$H_s = \frac{8m}{\pi^2 g} \left( \frac{f_s L_s Q_s^2}{D_s^5} \right) \quad \text{(Equação 5)}$$

$$H_r = \frac{8m}{\pi^2 g} \left( \frac{f_r L_r Q_r^2}{D_r^5} \right) \quad \text{(Equação 6)}$$

$$H_t = \frac{8m}{\pi^2 g} \left( \frac{f_t L_t Q_t^2}{D_t^5} \right) \quad \text{(Equação 7)}$$

Nessas equações:

- $m$  é o coeficiente de ampliação para perdas por atrito;
- $g$  é a aceleração devido à gravidade;
- $f_s$ ,  $f_r$  e  $f_t$  são, respectivamente, os fatores de atrito para os tubos de sucção, descarga e tanque;
- $L_s$ ,  $L_r$  e  $L_t$  são, respectivamente, os comprimentos dos tubos de sucção, descarga e tanque;
- $Q_s$ ,  $Q_r$  e  $Q_t$  são, respectivamente, as taxas de fluxo nos tubos de sucção, descarga e tanque;
- $D_s$ ,  $D_r$  e  $D_t$  são, respectivamente, os diâmetros dos tubos de sucção, descarga e tanque.

Os coeficientes de atrito são calculados explicitamente por meio das equações de Colebrook-White (8 a 10). Nessas equações,  $\epsilon$  é a rugosidade do material.

$$f_s = \left( \frac{1}{-2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{3,7D_s - \frac{5,16}{Re_s} \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{3,7D_s} + \frac{5,09}{Re_s^{0,87}} \right)} \right)} \right)^2 \quad \text{(Equação 8)}$$

$$f_r = \left( \frac{1}{-2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D_r - \frac{5,16}{Re_r} \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D_r} + \frac{5,09}{Re_r^{0,87}} \right)} \right)} \right)^2 \quad \text{(Equação 9)}$$

$$f_t = \left( \frac{1}{-2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D_t - \frac{5,16}{Re_t} \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D_t} + \frac{5,09}{Re_t^{0,87}} \right)} \right)} \right)^2 \quad \text{(Equação 10)}$$

Nas equações 8 a 10, os números de Reynolds  $Re_s$ ,  $Re_r$  e  $Re_t$  são calculados por meio das equações 11 a 12.

$$Re_s = \frac{v_s D_s}{\nu} \quad \text{(Equação 11)}$$

$$Re_r = \frac{v_r D_r}{\nu} \quad \text{(Equação 12)}$$

$$Re_t = \frac{v_t D_t}{\nu} \quad \text{(Equação 13)}$$

Nessas equações:

- $v_s$ ,  $v_r$  e  $v_t$  são, respectivamente, as velocidades nos tubos de sucção, descarga e tanque.
- $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

O ponto de operação é calculado iterativamente definindo o zero da equação 14, usando o método da bissecção. Esta equação é uma função da vazão  $Q$ , calculada pela equação 2.

$$f(Q) = H_{bomba} - H_{sistema} \quad \text{(Equação 14)}$$

A potência necessária para acionar a bomba é dada pela equação 15. A eficiência da bomba,  $\eta$ , é considerada nesta equação.

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad \text{(Equação 15)}$$

### 3 - Resultados

#### 3.1 - Interface gráfica do usuário

O laboratório virtual pode ser acessado no endereço (removido durante a fase de análise do artigo, para evitar a identificação dos autores).

O recurso de design responsivo da solução leva a diferentes layouts de informações na tela, dependendo do tipo de dispositivo usado para executar o laboratório virtual.

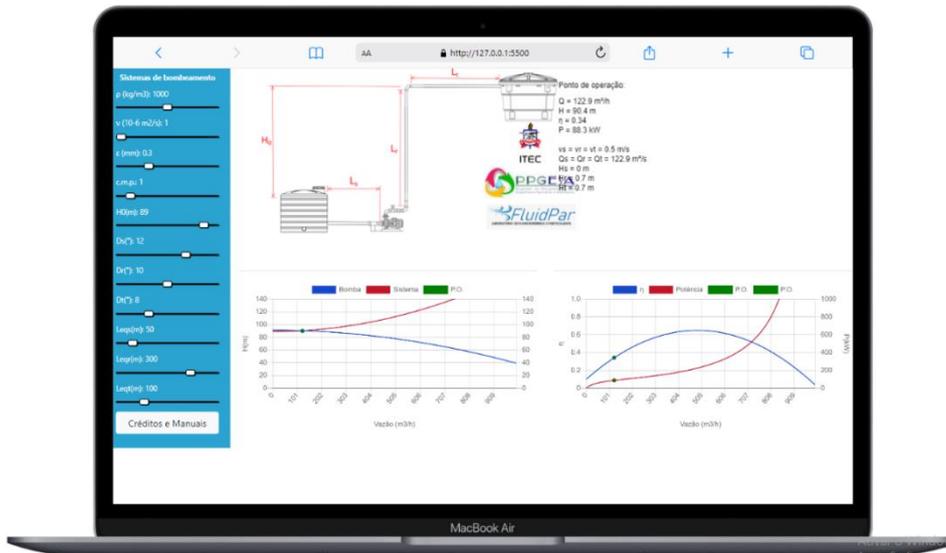


Figura 2 - GUI em uma interface de PC

A GUI do smartphone é mostrada na Figura 3. Ao rolar a tela, o usuário pode visualizar os gráficos que são permanentemente visíveis no caso da interface do PC, como mostrado na Figura 3, à esquerda e ao centro. O botão Configuration no canto superior direito da GUI permite que o usuário acesse o menu de controles deslizantes, como mostrado na Figura 3, à direita. Para retrair este menu, o usuário deve tocar novamente no mesmo botão de configuração que permitiu acessá-lo.

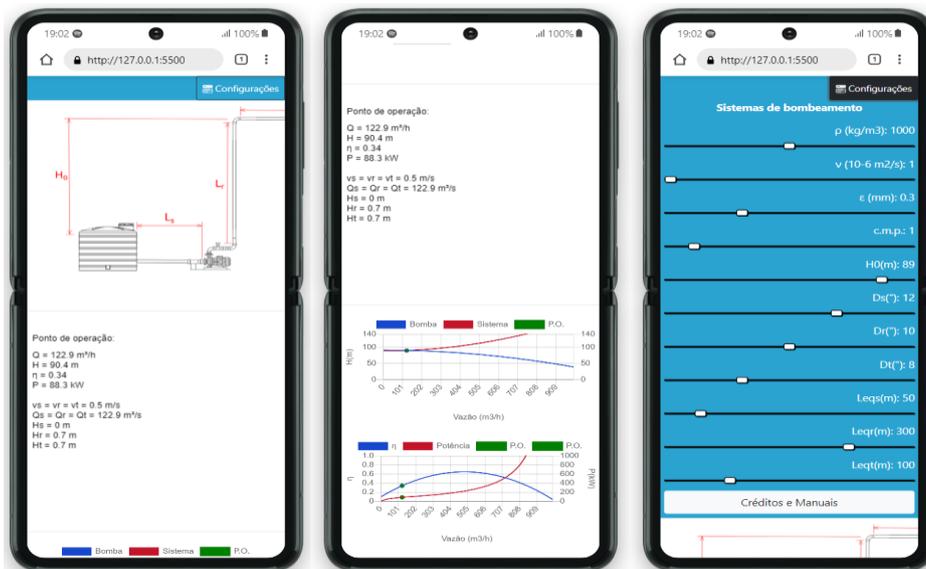


Figura 3 - GUI em uma interface de PC

A interface gráfica do tablet é mostrada na Figura 4. Os recursos neste caso são os mesmos da interface gráfica do smartphone, mas com uma área mais ampla para dispor as informações.

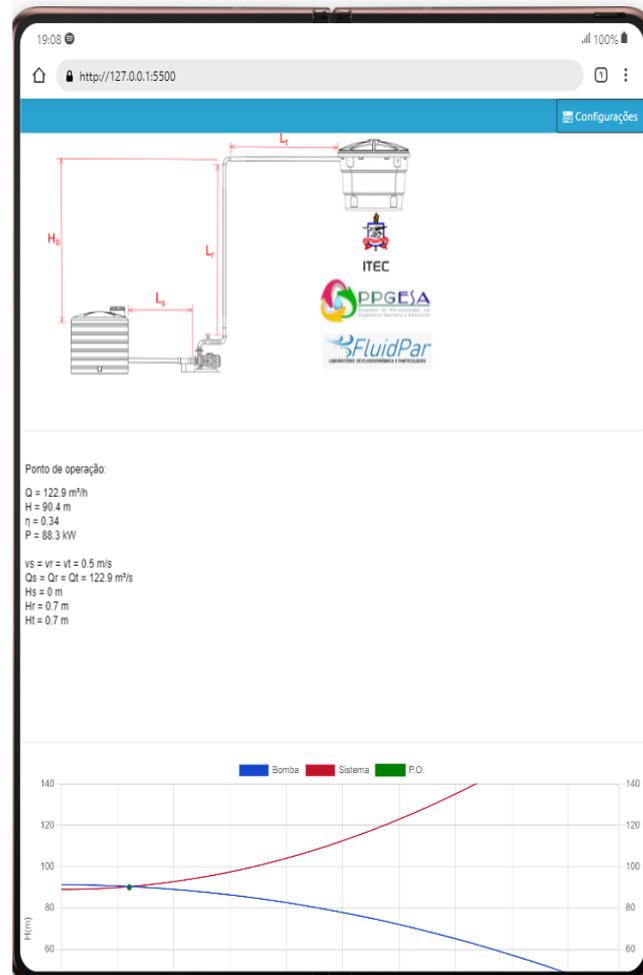


Figura 4 - GUI em um tablet (acesso a todos os gráficos e menus da mesma forma que no caso de smartphones)

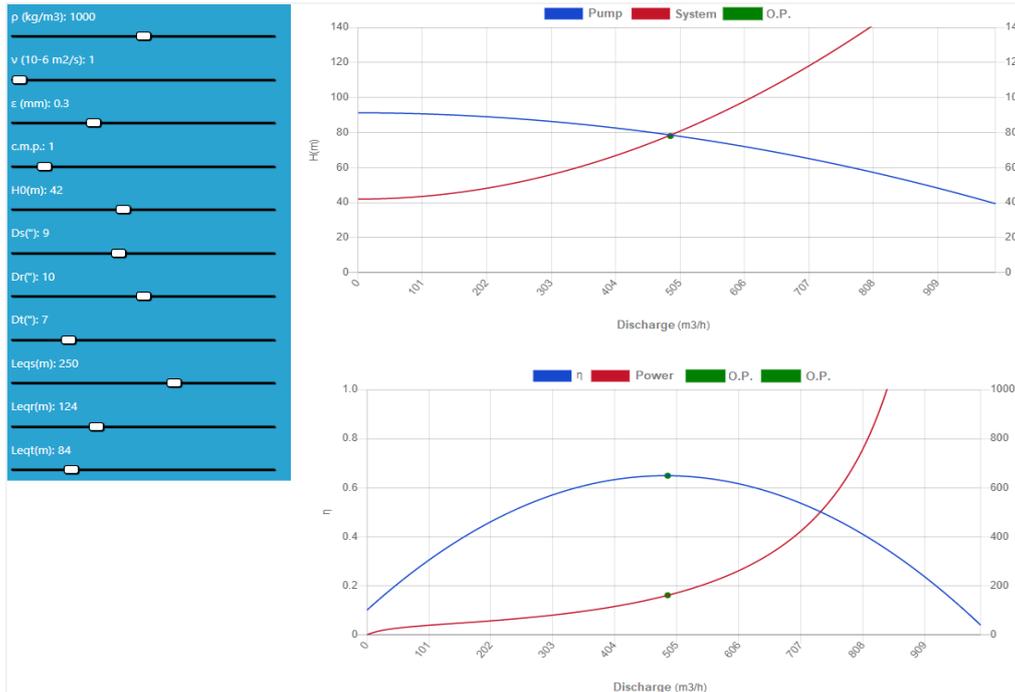
### 3.2 - Manuais de Uso e Experimentos

O principal uso do laboratório é complementar atividades práticas realizadas em bancadas reais. O laboratório virtual permite então expandir os achados obtidos a partir dessas experiências.

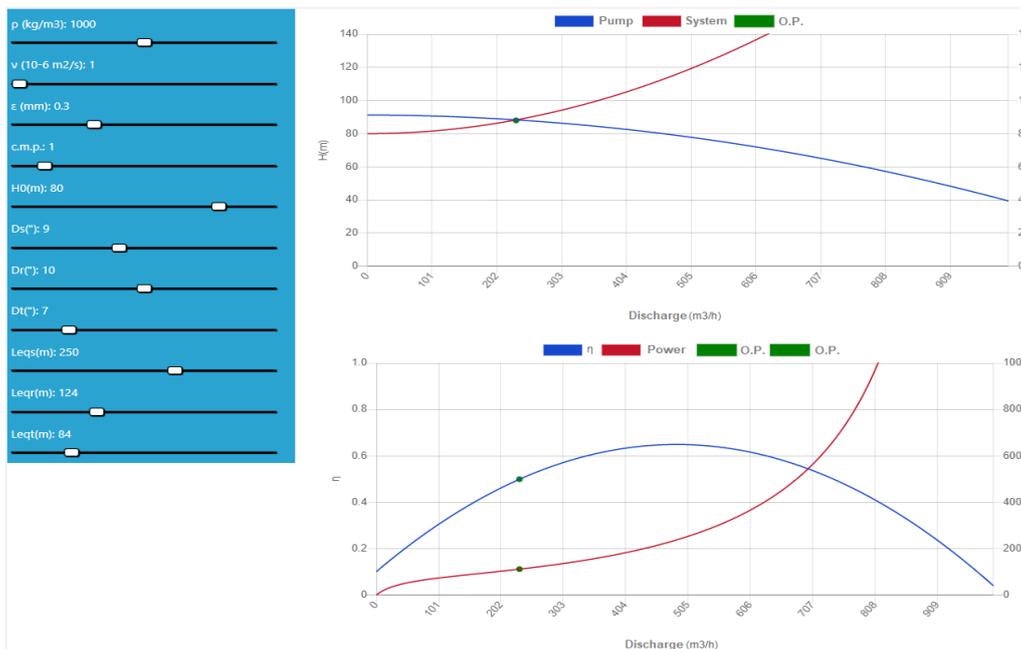
Ao utilizar o laboratório, duas abordagens são possíveis: a) seguir as instruções contidas nos manuais de experimentos; b) explorar o comportamento do laboratório virtual por conta própria.

Os manuais de experimentos foram projetados para orientar as atividades iniciais dos alunos no laboratório. Eles contêm instruções para realizar as variações dos parâmetros do sistema.

As saídas do laboratório virtual para uma dada combinação de parâmetros de entrada são mostradas na Figura 5. Note que, neste caso, a eficiência está no seu máximo. A Figura 6 mostra uma situação diferente, mas apenas altera a variável  $H_0$ . Fica claro a partir desta situação que uma mudança nas condições de operação pode ter um efeito dramático no desempenho da bomba.



**Figura 5 - Resultados de uma dada combinação de parâmetros de entrada - Alta eficiência**



**Figura 6 - Resultados de uma dada combinação de parâmetros de entrada - Baixa eficiência**

Depois que o aluno tiver concluído as atividades nos manuais de experimentos, ele estará livre para realizar outras atividades para estabelecer suas próprias relações de causa e efeito.

### 3.3 - Pesquisa de opinião sobre o uso do laboratório

Foi realizada uma pesquisa com um total de 29 indivíduos, alunos de uma disciplina de Hidráulica Aplicada em uma formação de Engenharia Civil. As perguntas feitas eram todas

relacionadas a se os usuários aumentaram seus conhecimentos após o uso do laboratório virtual. Os aspectos avaliados foram conhecimento sobre a curva da bomba, perdas no sistema, eficiência, potência motriz, viscosidade do fluido, densidade do fluido, rugosidade da tubulação, diferença de altura entre tanques, diâmetros e comprimentos de tubulação.

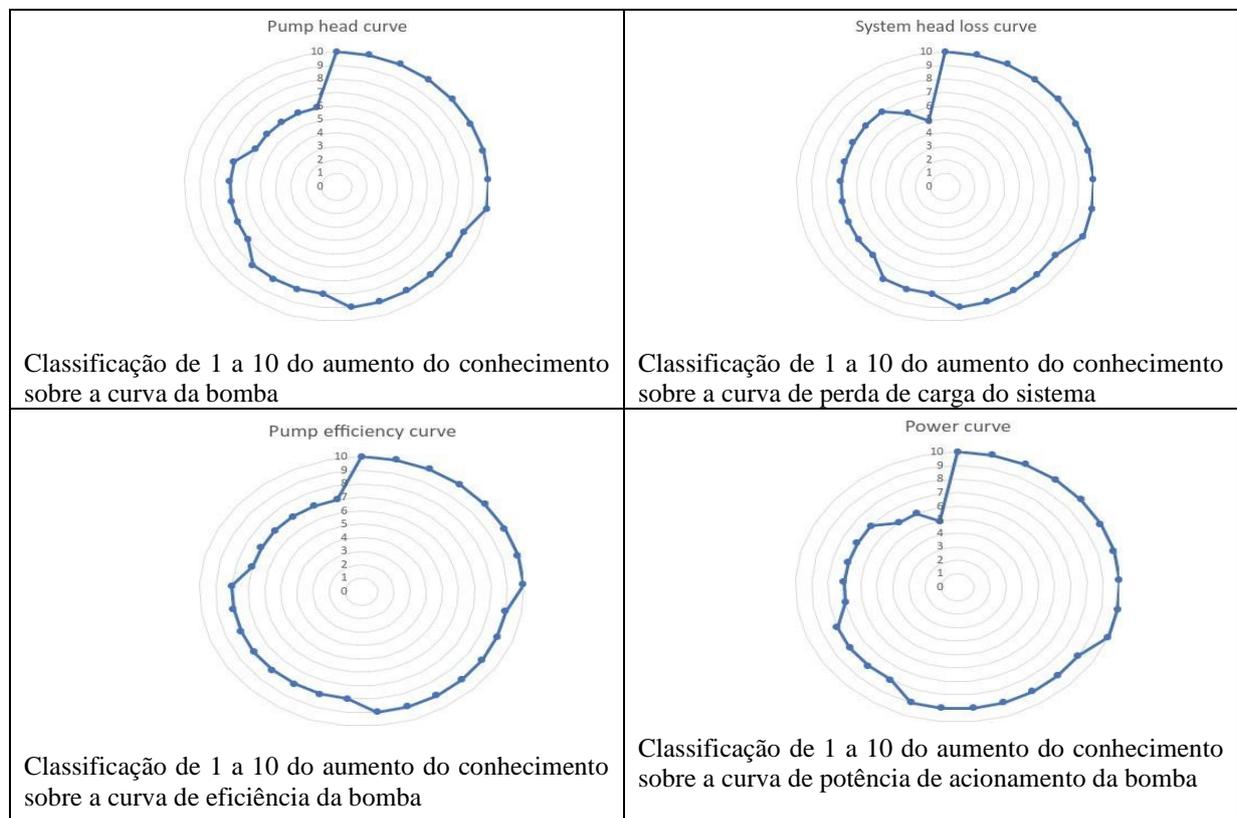
Os resultados estão resumidos na tabela 1. Nesta tabela,  $\mu$  é a média e  $\sigma$  é o desvio padrão. A nota da avaliação variou de zero (menor ganho de conhecimento) a dez (maior ganho de conhecimento). Pode-se observar que as notas variam de 8,14 a 8,59, com desvio padrão variando de 1,12 a 1,81. Isso indica uma experiência de aprendizagem efetiva considerando todos os parâmetros estudados.

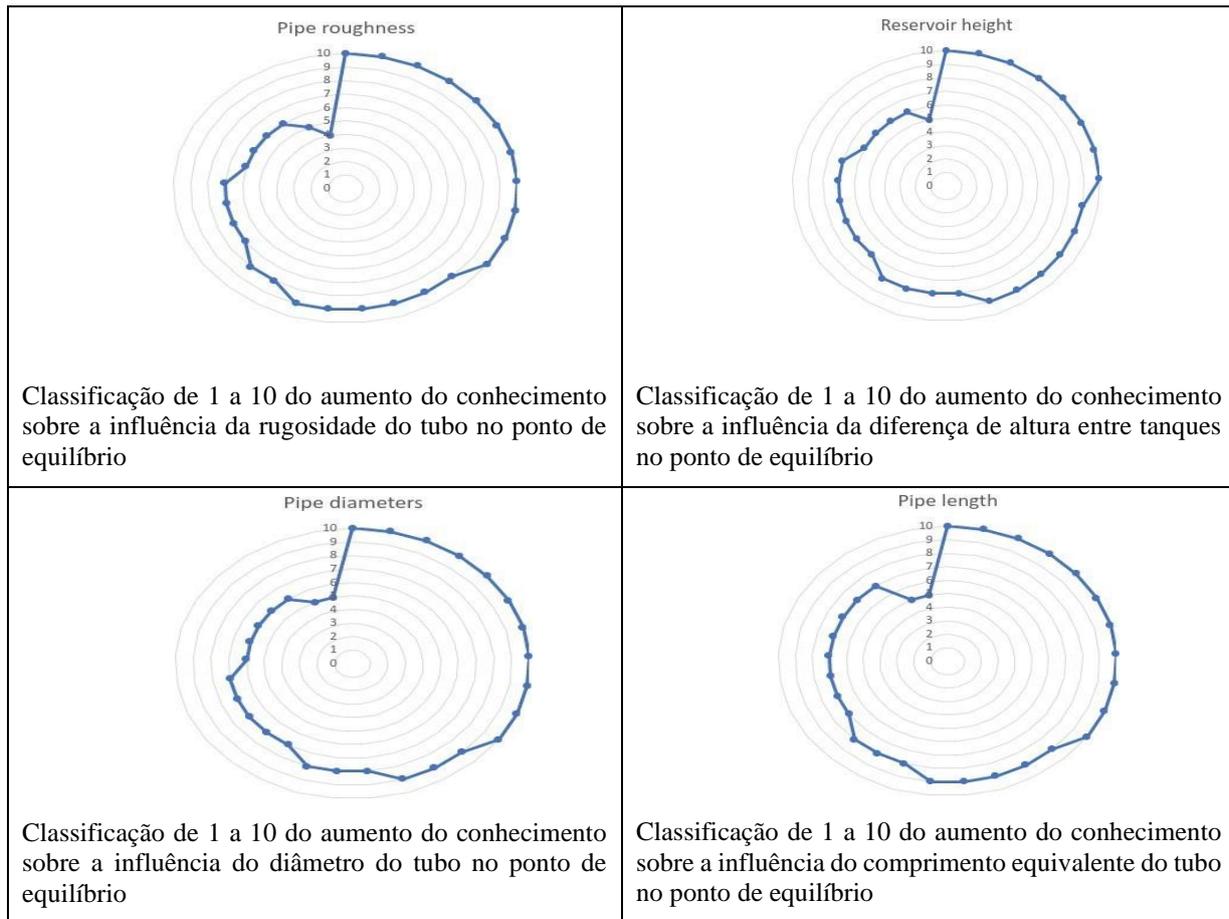
Dos resultados da pesquisa, a eficiência da bomba é o parâmetro que mais se beneficiou do uso do laboratório virtual. Ele apresentou a maior nota média de avaliação e o menor valor de desvio padrão. Mas, em geral, os valores médios de todos os parâmetros são próximos uns dos outros. A média do valor médio da tabela 1 é 8,36, com um desvio padrão de 0,159 e a média do desvio padrão é 1,54, com um desvio padrão de 0,214. Isso indica um bom resultado geral em relação ao conhecimento adquirido pelos usuários.

**Tabela 1-** Resultados da pesquisa

	Pump head	System head loss	Pump efficiency	Driving power	Pipe roughness	Upper tank height	Pipe diameters	Pipe length
$\mu$	8.31	8.38	8.59	8.52	8.31	8.17	8.14	8.45
$\sigma$	1.51	1.50	1.12	1.48	1.81	1.56	1.79	1.57

A figura 7 mostra as classificações obtidas na pesquisa.





**Figura 7 - Classificação de 1 a 10 das perguntas feitas na pesquisa**

Havia uma seção de comentários e sugestões na pesquisa. Entre as sugestões escritas para melhorias no laboratório, alguns alunos afirmaram que seria útil ter a opção de também inserir valores diretamente digitando os valores numéricos, além de usar os controles deslizantes.

Os pontos positivos mencionados nos comentários incluíram a interface de informações diretas, a utilidade para consolidar o conhecimento, a promoção de inter-relações entre os componentes do sistema de bombeamento e a facilidade de uso, especialmente em dispositivos móveis.

#### 4 - Conclusões

O laboratório virtual desenvolvido permite que os alunos construam relações de causa e efeito entre as características físicas e geométricas de um sistema de bombeamento e os gráficos que caracterizam seu desempenho. A pesquisa de opinião realizada leva à conclusão de que, de forma geral, o ganho de aprendizagem alcançado pelos alunos por meio do uso do laboratório virtual foi significativo. Um dos recursos que mais agradou os usuários foi o acesso ao laboratório por meio de smartphones. O motivo para isso pode estar relacionado à interface responsiva.

Quanto aos desenvolvimentos futuros, a pesquisa de opinião mostrou que a possibilidade de inserir números definindo os parâmetros físicos e geométricos que caracterizam o sistema deve ser trabalhada. Isso pode ser alcançado usando caixas de texto.

Diferentes cenários de simulação também podem ser incorporados ao laboratório. Por exemplo, a possibilidade de testar outros circuitos, como tubulações de ramificação; a influência de válvulas de controle, em mais de um tanque superior; a influência do controle de velocidade de rotação da bomba na economia de energia.

Pode ser útil implementar uma animação gráfica para o sistema de bombeamento, para que o feedback visual possa ser obtido da variação dos parâmetros. Por exemplo, o crescimento nas velocidades causado pela mudança do diâmetro do tubo ou a mudança na posição dos tanques superior e inferior. Mas isso exigiria uma remodelação da interface. Uma opção poderia ser adicionar um painel.

Outra melhoria que pode ser implementada é a possibilidade de testar diferentes bombas definindo as curvas de altura manométrica e eficiência para diferentes modelos como uma entrada definida pelo usuário.

## 5 – Referências bibliográficas

Alsharif A (2021) Effect of using virtual lab simulations on student's learning in online general physics courses. *International Journal of Education* 14(3):89– 99.

Bassegio P, Castiglio G, Monteiro L, et al (2022) Laboratório virtual de bombas hidráulicas. *I Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica - Ouro Preto/MG*.

Bowtell L, Moloney C, Kist A, et al (2012) Using remote access laboratories in nursing education. *9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, Bilbao, Spain pp 1–7.

Boyle E, Hailey T, Connolly T, et al (2016) An update to the systematic literature review of empirical evidence of the impacts and outcomes of computer games and serious games. *Computers & Education* 94:178–192.

Casals-Torrens P (2013) Virtual laboratory for learning asynchronous motors in engineering degrees. *IEEE Journal of Latin-American Learning Technologies* 8(2):71–76.

Chen X, Zou D, Xie H (2020) Detecting latent topics and trends in educational technologies over four decades using structural topic modeling: A retrospective of all volumes of computers & education. *Computers & Education* 151.

Ezika I, Ndu I, Chukwueke T, et al (2023) Assessing opportunities for self-study and out-of-class activities in a prescriptive high contact-hour engineering curriculum. *IEEE Transactions on Education* 66(1):4–11.

Fontes, M.A.F., Paulino, O. F. Aprendizagem significativa sobre bombas hidráulicas por meio de um objeto de aprendizagem. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 43, 2024.

Gordillo A, López-Fernández D, Tovar E (2022) Comparing the effectiveness of video-based learning and game-based learning using teacher-authored video games for online software engineering education. *IEEE Transactions on Education* 65(4):524–532.

Gosman A, Launder B, Lockwood F, et al (1976) Computer assisted teaching of fluid mechanics and heat transfer. *Computer & Education* 1(1):131–139.

Gui M, Geroza T, Argentin G, et al (2023) Mobile media education as a tool to reduce problematic smartphone use: Results of a randomised impact evaluation. *Computers & Education* 194.

- Gunawan G, Nisrina N, Herayanti N, et al (2018) Virtual laboratory to improve students' conceptual understanding in physics learning. *IOP Conf Series: Journal of Physics: Conf Series* 1108.
- Hamed G, Aljanazrah A (2020) The effectiveness of using virtual experiments on students' learning in the general physics lab. *Education Research* 19:976– 995.
- Heradio R, de la Torre L, Galan D, et al (2016) Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computers & Education* 98:14–38.
- Hillmayr D, Ziernwald L, Reinhold F, et al (2020) The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education* 153.
- Hooshyar D, Ahmad R, Yousefi M, et al (2016) Applying an online game- based formative assessment in a flowchart-based intelligent tutoring system for improving problem-solving skills. *Computers & Education* 94.
- Kim M, Jeong J (2017) Experimental verification of a virtual water flowmeter applicable to air conditioning systems. *Energy and Buildings* 155:425–438.
- Langbeheim E, Levy S (2019) Diving into the particle model: Examining the affordances of a single user participatory simulation. *Computers & Education* 139.
- Lei Z, Zhou H, Hu W, et al (2018) Html5-based 3-d online control laboratory with virtual interactive wiring practice. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14(6):2473–2483.
- Lima A, Rodrigues A, Martins D, et al (2012) Desenvolvimento de uma bancada virtual de sistemas de bombeamento. *XL Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - Belém-PA (Brasil)*.
- Mesquita A, Silva L, Júnior O, et al (2006) Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia. *VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - João Pessoa (Brasil)*.
- Nedeljkovic M, Cantrak D, Jankovic N, et al (2018) Virtual instruments and experiments in engineering education lab setup with hydraulic pump. *IEEE Global Engineering Education Conference, Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain* pp 1139–1146.
- Nolen S, Koretsky M (2018) Affordances of virtual and physical laboratory projects for instructional design: Impacts on student engagement. *IEEE Transactions on Education* 61(3):226–233.
- Post L, Guo P, Saab N, et al (2019) Effects of remote labs on cognitive, behavioral, and affective learning outcomes in higher education. *Computers & Education* 140.
- Qu D, Luo W, Liu Y, et al (2019) Simulation and experimental study on the pump efficiency improvement of continuously variable transmission. *Mechanism and Machine Theory* 131:137–151.
- Ramírez-Romero J, Rivera-Rodríguez S (2018) Characteristics and functions of a virtual laboratory of induction machines in the teaching environment. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje* 13(4):130–135.
- Tlaczala W, Grajner G, Zaremba M (2008) Virtual laboratory with simulated nuclear physics experiments. *IEEE Transactions on instrumentation and management* 57(8):1766–1770.



Torbaghan M, Sasidharan M, Jefferson I, et al (2023) Preparing students for a digitized future. *IEEE Transactions on Education* 66(1):20–29.

Tzafestas C, Palaiologou N, Alifragis M (2006) Virtual and remote robotic laboratory: Comparative experimental evaluation. *IEEE Transactions on Education* 49(3):360–369.

Vasiliadou R (2020) Virtual laboratories during coronavirus (covid-19) pandemic. *Biochemistry and Molecular Biology Education* 48:482–483.

Wen C, Liu C, Chang H, et al (2020) Students' guided inquiry with simulation and its relation to school science achievement and scientific literacy. *Computers & Education* 149.

Zamir M, Abid M, Fazal M, et al (2022) Switching to outcome-based education (obe) system, a paradigm shifts in engineering education. *IEEE Transactions in Education* 65(4):695–702.

Zhao D, Muntean C, Chis A, et al (2022) Game-based learning: Enhancing student experience, knowledge gain, and usability in higher education programming courses. *IEEE Transactions on Education* 65(4):502–513.