



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS TRINDADE – CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Guilherme Augusto de Matheucci e Silva Teixeira

**Laboratório virtual de simulação de um sistema de bombeamento para aplicação no ensino de Hidráulica**

Florianópolis  
2019

Guilherme Augusto de Matheucci e Silva Teixeira

**Laboratório virtual de simulação de um sistema de bombeamento para aplicação no ensino de Hidráulica**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental  
Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Nadia Bernardi Bonumá, Dr<sup>ª</sup>.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Teixeira, Guilherme Augusto de Matheucci e Silva  
Laboratório virtual de simulação de um sistema  
de bombeamento para aplicação no ensino de  
Hidráulica / Guilherme Augusto de Matheucci e Silva  
Teixeira ; orientadora, Nadia Bernardi Bonumá, 2019.  
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Hidráulica. 3. Laboratórios  
Virtuais. 4. Ensino de Engenharia. I. Bonumá, Nadia  
Bernardi. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III.  
Título.

Guilherme Augusto de Matheucci e Silva Teixeira

**Laboratório virtual de simulação de um sistema de bombeamento para aplicação no ensino de Hidráulica**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.(a)

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Patrícia Kazue Uda, Dr.(a)

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Ramon Lucas Dalsasso, Dr.(a)

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental na área de Engenharia Ambiental

---

Prof.(a) Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.(a)

Coordenador(a) do Programa

---

Prof.(a) Nadia Bernardi Bonumá, Dr.(a)

Orientador(a)

Florianópolis, 2019

Este trabalho é dedicado à minha família, amigos, namorado e professores, que permitiram a sua conclusão.

## AGRADECIMENTOS

Muitos pensam no que escrever na seção de agradecimentos. A maioria pensa que essa é uma seção sublime, onde finalmente podemos escrever sem regras e dedicar toda a nossa gratidão aos pais, amigos, familiares, maridos, mulheres, namorados, namoradas, filhos, avós, padrinhos.

E de fato é o momento. Passamos meses (ou anos) escrevendo e pesquisando. Nesse meio tempo, muitas pessoas nos ajudam, seja na pesquisa, seja dando apoio, ou mesmo atuando o nosso estresse ou as nossas crises de ansiedade. Essa é a hora perfeita para dedicar todo o nosso agradecimento a elas.

E por isso eu não deixo de agradecer! Agradeço a todos que contribuíram para isso. Não é preciso citar nomes. Todos que contribuíram de alguma forma sabem disso. Mas lá vai... Rossana, Jú-lio, Zeli, Joãozinho, Walmor, Miranda, Xande, Paulo, Tio Lilo, Antônio Henrique, Monique, Maria Cristina, Fido, Luna Beatriz, e muitos outros.

Agradeço sobretudo à CNPQ pelo financiamento e pela bolsa de mestrado nesses dois anos.

Mas além de agradecer e frisar todas essas pessoas, eu quero agradecer a entidade mais importante de todas: a vida. Não quero fazer discurso barato ou textões do *Facebook*. Mas não agradecer a vida e o choque de realidade que eu recebi com esse mestrado me fará sentir que falta alguma coisa nesse texto.

Eu sempre tive um objetivo claro desde o início da graduação. Queria ser professor. Dar aulas era a minha vocação e todas as vias acadêmicas serviriam apenas com o objetivo de titulação para chegar a esse fim. Como eu estava errado!

A vida passa por diversas etapas e cada uma é de extrema importância, mesmo que não estejamos perfeitamente cientes na hora. A realização do mestrado me fez ver todo o meu plano de carreira com outros olhos. Não posso negligenciar etapas como mestrado ou doutorado. Todos eles são muito importantes inclusive para eu me tornar um professor melhor.

Eu vi que não basta eu fazer pesquisas científicas aleatórias para me tornar um professor. É preciso ter um foco e buscar pesquisas que contribuam para a evolução da minha carreira. E agradeço ao professor Pedro por me fazer enxergar isso. Apesar de não ter seguido exatamente a linha de pesquisa que ele me falou, eu abri os olhos.

Foi um processo difícil e árduo de amadurecimento e aí agradeço à professora Nadia, minha orientadora. Ela me fez ver que o ensino não é apenas o fim, mas também pode ser o meio. Essa pesquisa, considerada “diferentona”, é apenas reflexo de que posso ser um pesqui-

sador de algo e esse algo é a própria educação. Por isso quero novamente agradecer a todos e novamente agradecer a vida. Espero que esse mestrado seja apenas um passo da construção da minha carreira.

## RESUMO

A Hidráulica possui várias aplicações na Engenharia, como saneamento, instalações hidráulico-prediais e geração de energia. Apresentar uma visão prática aos estudantes de Hidráulica é fundamental para o seu desenvolvimento profissional, permitindo que os mesmos confrontem situações reais antes de se embrenharem no mercado de trabalho. Frente a essa necessidade, surgem, nas universidades, laboratórios de treinamento, buscando uma visão prática de sistemas da vida profissional, ainda que simulada. Entretanto, esses experimentos estão limitados ao espaço e tempo restritos pela disciplina. A partir disso, este trabalho buscou uma alternativa complementar aos experimentos físicos, criando um sistema virtual de simulação de um circuito de bombeamento e cavitação, buscando alternativas que extrapolam o que pode ser obtido com um protótipo real. O laboratório virtual foi calibrado pelo modelo GLUE a partir de um experimento real situado no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Santa Catarina. O programa, denominado LabHidra.com foi criado com a linguagem *Visual Basic*, que permite uma interação com o usuário após pronto. O laboratório virtual recriou os experimentos reais, promovendo adições como mudança de material, alteração na posição da bomba e do nível do reservatório. Além disso, por ser um material didático, concedeu explicações sempre que fossem necessárias. Com isso, o estudante pode ampliar os conhecimentos acerca do conteúdo, explorando situações inviáveis em um sistema físico. A avaliação da viabilidade do programa foi feita a partir de testes de hipótese acerca de uma comparação de desempenho entre alunos que o utilizaram e aqueles que apenas trabalharam com o experimento real. Além disso, foi feita uma análise opinativa, baseada em um questionário de aceitação, tanto do sistema físico, quanto do virtual. Com 95% de confiabilidade, os testes mostraram que o uso do laboratório promoveu uma melhora nas notas dos estudantes. Para a análise de opinião, com um nível de confiança de 99,9%, testes apontaram que a aceitação ao laboratório virtual foi mais favorável que a do real. Os resultados indicaram que a inserção de tecnologia pode ser fundamental para um maior aprimoramento profissional e acadêmico do estudante, devendo ser encorajada pelo corpo docente dos cursos de Engenharia.

**Palavras-chave:** Hidráulica, Laboratórios Virtuais, Ensino de Engenharia.

## ABSTRACT

Hydraulics has various applications in Engineering, such as sanitation, hydraulic building installations and power generation. Therefore, a practical view of the students of Hydraulics is fundamental for professional development, which allows them to confront real situations before embarking on the job market. From this need, training laboratories emerge in the universities, which present a practical vision of systems of professional life, even if simulated. However, these experiments are limited to a space and time constrained by the discipline and the place where they are located. Considering the limitations presented, this work seeks a complementary alternative to the physical modules, creating a virtual system of simulation of a pumping and cavitation circuit. Thus, one can find alternatives that extrapolate what can be obtained with a real prototype. The virtual laboratory was calibrated by the GLUE model from a real experiment located at the Hydraulic Laboratory of the Federal University of Santa Catarina. The program, called LabHidra.com was created using the Visual Basic language. The language allows an interaction with the user after the generation of an executable. The virtual lab recreated the actual experiments, with additions such as material change, change in pump position and reservoir level. In addition, as it was a didactic material, it provided explanations whenever necessary. Thus, the student can expand the knowledge about the content and can explore unfeasible situations in a physical system. The viability of the program was evaluated from hypothesis tests about a performance comparison between students who used it and those who only worked with the actual experiment. In addition, an opinionated analysis was made based on an acceptance questionnaire of both the physical and virtual systems. With level of significance equal to 5%, the tests showed the use of the laboratory promoted an improvement in the students' grades. For the opinion analysis, with a level of significance equal to 0,1%, tests indicated that the acceptance to the virtual laboratory was more favorable than the real one.

**Keywords:** Hydraulics, Virtual Laboratories, Engineering Teaching

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Uso do modelo CFD para representação do vórtice de uma bomba centrífuga. ....	23
Figura 2 – Bancada elaborada para avaliar o desempenho de associações de bombas. ....	25
Figura 3 – Comparação do modelo UF na aderência dos dados de simulação de pressão. ....	28
Figura 4 – Registro gráfico do fenômeno de cavitação. ....	28
Figura 5 – Passos a serem usados para cada iteração do Método Simplex. ....	31
Figura 6 – Partes da interface apresentada por um laboratório virtual de circuitos. ....	39
Figura 7 – Interface de um laboratório virtual de Mecânica dos Fluidos. ....	40
Figura 8 – Representação de um simulador quadrimotor utilizado no ensino de eletrônica. ....	41
Figura 9 – Fluxograma metodológico da elaboração do laboratório virtual de bombeamento	43
Figura 10 – Estrutura física do protótipo de bombeamento e cavitação situado no LabHidra.	44
Figura 11 – Estrutura de válvulas do experimento de bombeamento/cavitação do LabHidra.	45
Figura 12 – Fluxograma explicativo do funcionamento do módulo de válvulas. ....	47
Figura 13 – Fluxograma representativo do funcionamento do módulo de bombeamento. ....	49
Figura 14 – Fluxograma representativo do funcionamento do módulo de cavitação. ....	51
Figura 15 – Aderência da calibração do modelo GLUE no trecho VB3 – VB1. ....	66
Figura 16 – Aderência da validação do modelo GLUE no trecho RA – VB1. ....	67
Figura 17 – Aderência da validação do modelo GLUE no trecho MB1 – MB2. ....	68
Figura 18 – Método de regressão para a construção da CCB da bomba 1. ....	70
Figura 19 – Método de regressão para a construção da CCB da bomba 2. ....	71
Figura 20 – Método de regressão linear para a construção da CPD associada à bomba 1. ....	71
Figura 21 – Método de regressão linear para a construção da CPD associada à bomba 2. ....	72
Figura 22 – Logotipo do laboratório virtual desenvolvido neste projeto. ....	73
Figura 23 – Tela principal do <i>LabHidra.com</i> . ....	73
Figura 24 – Botão presente no programa, com o objetivo de acionar explicações. ....	75
Figura 25 – Tela de introdução às explicações didáticas do <i>LabHidra.com</i> . ....	75
Figura 26 – Tela única do módulo de configuração do circuito do <i>LabHidra.com</i> . ....	76
Figura 27 – Alerta de validade da configuração escolhida emitido pelo <i>LabHidra.com</i> ....	77
Figura 28 – Tela principal do módulo de bombeamento do <i>LabHidra.com</i> . ....	78
Figura 29 – Exemplo da CCB individual e da CCB em série geradas pelo <i>LabHidra.com</i> . ....	79
Figura 30 – Tela da primeira subseção do módulo de cavitação do <i>LabHidra.com</i> . ....	81
Figura 31 – Imagem de alerta no momento de ocorrência da cavitação. ....	81
Figura 32 – Tela da segunda subseção do módulo de cavitação do <i>LabHidra.com</i> . ....	82

Figura 33 – Tela da terceira subseção do módulo de cavitação do <i>LabHidra.com</i> .....	83
Figura 34 – Aviso de reabertura da VSC no módulo de cavitação do <i>LabHidra.com</i> .....	84
Figura 35 – Histograma de distribuição de notas dos estudantes de Hidráulica .....	86
Figura 36 – Diagrama de caixas comparativo entre os grupos analisados na pesquisa.....	87
Figura 37 – Diagrama de caixas comparativo entre os subgrupos analisados na pesquisa. ....	88
Figura 38 – Diagrama de caixas comparativo entre as duas turmas no experimento 1.....	90
Figura 39 – Diagrama de caixas comparativo entre os pontos de cada um dos questionários.	94

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características das diferentes abordagens de aprendizagem. ....	34
Quadro 2 – Características das diferentes teorias de ensino.....	36
Quadro 3 – Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de laboratórios. ....	37
Quadro 4 – Cálculos do valor equivalente (eq) a partir de bombas individuais (a, b). ....	53
Quadro 5 – Hipóteses a serem verificadas pelos testes estatísticos de média. ....	60
Quadro 6 – Dados de entrada do intervalo de confiança definido pela distribuição <i>t-student</i> . ....	61
Quadro 7 – Definição dos pontos para cada uma das respostas do questionário de opinião....	63
Quadro 8 – Resumo das seções do <i>LabHidra.com</i> . ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação da pressão de vapor em função da temperatura do escoamento. ....	27
Tabela 2 – Análise comparativa do tempo de realização de um experimento de eletrônica....	38
Tabela 3 – Análise comparativa da realização de testes com ou sem um laboratório virtual. .	40
Tabela 4 – Características geométricas e energéticas por trecho do experimento real. ....	64
Tabela 5 – Limites e resultados da calibração dos parâmetros através do método GLUE.....	65
Tabela 6 – Funções objetivo após a aplicação do modelo GLUE no experimento real. ....	69
Tabela 7 – Funções objetivo após a aplicação da regressão nas curvas de bombeamento.....	72
Tabela 8 – Rugosidades dos materiais usados no módulo de bombeamento do programa.....	78
Tabela 9 – Características descritivas do desempenho dos grupos na atividade avaliativa. ....	85
Tabela 10 – Resultado do teste de hipóteses de desempenho comparativo entre os grupos. ...	89
Tabela 11 – Resultado do teste de hipótese de desempenho comparativo entre as turmas. ....	91
Tabela 12 – Resultado ajustados do teste de desempenho comparativo entre os grupos. ....	91
Tabela 13 – Quantidade de respostas adjetivas para o experimento real e virtual. ....	92
Tabela 14 – Características descritivas da pontuação de cada grupo de questionário. ....	93
Tabela 15 – Resultado do teste de hipótese opinativo comparativo entre os experimentos.....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCB – Curva Característica da Bomba;

CFD – Fluidodinâmica Computacional (*Computation Fluid Dynamic*);

CPD – Curva de Potência Elétrica Disponível para o funcionamento de uma bomba;

GLUE – Estimativa de incerteza de probabilidade generalizada (*Generalised Likelihood Uncertainty Estimation*);

LabHidra – Laboratório de Hidráulica da UFSC;

mca – Metros de Coluna d'Água;

NPSH - Carga Líquida Positiva de Sucção (*Net Positive Suction Head*);

NSE – Coeficiente de Eficiência de Nash (*Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient*);

PPGEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFSC;

RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio (*Root-Mean-Square Error*);

UF – Instabilidade de Atrito (*Unsteady friction*);

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

## LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
$\cos \varphi$	Fator de potência do motor elétrico de uma bomba	–
$\eta_m$	Rendimento do motor elétrico de uma bomba	–
$p_i$	Pressão dinâmica média da seção transversal $i$ de um escoamento	Pa
$z_i$	Cota geométrica na seção transversal $i$ de um escoamento	m
$v_i$	Velocidade média da seção transversal $i$ de um escoamento	m/s
$\gamma$	Peso específico do líquido em escoamento	N/m <sup>3</sup>
$g$	Aceleração da gravidade local	m/s <sup>2</sup>
$\Delta H_{ij}$	Perda de carga entre duas seções transversais $i$ e $j$ do escoamento	m
$H$	Altura manométrica fornecida por uma bomba	m
$f$	Fator de atrito de uma tubulação	–
$L$	Comprimento de uma tubulação dentro de um volume de controle	m
$D$	Diâmetro da seção transversal de uma tubulação	m
$Re$	Número de Reynolds do fluido de um escoamento	–
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta do material de uma tubulação	m
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido de um escoamento	m <sup>2</sup> /s
$P_h$	Potência Hidráulica do escoamento recebida por uma bomba	W
$Q$	Vazão do fluido que atravessa uma tubulação	m <sup>3</sup> /s
$\eta_h$	Rendimento hidráulico de uma bomba	–
$P_d$	Potência Disponível fornecida por uma rede elétrica	W
$x, z$	Parâmetros a serem ajustados para a otimização da CCB	–
$H_{m\acute{a}x}$	Altura manométrica máxima que uma bomba pode fornecer	m
$U$	Tensão (diferença de potencial) em uma rede elétrica	V
$i$	Corrente elétrica que atravessa uma rede elétrica	A
$C, D$	Parâmetros a serem ajustados para a otimização da CPD	–
$e$	Matriz de desvio local de um modelo	–
$\hat{D}$	Matriz de dados observados cujo resultado se quer modelar	–
$F$	Matriz de um modelo a ser otimizado	–
$X$	Matriz derivada de uma equação a ser modelada	–
$\theta$	Matriz de parâmetros a serem otimizados	–
$\hat{Q}_i$	Vazão observada em um determinado instante $i$	L/min

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
$\widehat{H}_i$	Altura manométrica observada em um determinado instante $i$	m
$\widehat{P}_{di}$	Potência disponível observada em um determinado instante $i$	W
$n_k$	Número elementos de uma amostra $k$	—
$\widehat{y}_i$	Dado observado $i$ de uma amostra	—
$y_i$	Dado modelado $i$ referente a uma amostra	—
$\bar{y}$	Média dos dados observados de uma amostra	—
$w_{ale}$	Valor aleatório final gerado para um parâmetro desejado	—
$w_{\min}$	Valor mínimo aceitável para um determinado parâmetro	—
$w_{\max}$	Valor máximo aceitável para um determinado parâmetro	—
$R$	Valor randômico entre 0 e 1 gerado por métodos computacionais	—
$GL_k$	Graus de liberdade de uma amostra $k$	—
$\mu_k$	Média de uma amostra $k$	—
$\alpha$	Nível de significância adotado para uma análise estatística	—
$1 - \alpha$	Nível de confiança adotado para uma análise estatística	—
$t_{obs}$	Medida estatística dos dados observados na distribuição <i>t-student</i>	—
$s^2_k$	Variância de uma amostra $k$	—
$s^2_p$	Variância relativa entre duas amostras	—
fc	Fator corretivo aplicado à análise estatística de desempenho	—

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS .....	20
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>20</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	HIDRÁULICA APLICADA .....	22
2.1.1	<b>Curvas de um sistema de bombeamento .....</b>	<b>24</b>
2.1.2	<b>Cavitação .....</b>	<b>26</b>
2.2	MODELAGEM DE PARÂMETROS .....	29
2.2.1	<b>Métodos de otimização local .....</b>	<b>29</b>
2.2.2	<b>Métodos de otimização global.....</b>	<b>31</b>
2.3	ENSINO DE ENGENHARIA .....	32
2.3.1	<b>Abordagens de aprendizagem .....</b>	<b>34</b>
2.3.2	<b>Teorias de Ensino.....</b>	<b>35</b>
2.3.3	<b>Uso de tecnologia e laboratórios virtuais.....</b>	<b>37</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
3.1	ANÁLISE DO EXPERIMENTO REAL.....	44
3.1.1	<b>Localização e estrutura .....</b>	<b>44</b>
3.1.2	<b>Procedimento experimental .....</b>	<b>46</b>
3.1.3	<b>Limitações do experimento real .....</b>	<b>46</b>
3.2	ESTRUTURA DO LABORATÓRIO VIRTUAL.....	47
3.2.1	<b>Módulo de configuração do circuito (válvulas).....</b>	<b>47</b>
3.2.2	<b>Módulo de Bombeamento .....</b>	<b>48</b>
3.2.3	<b>Módulo de cavitação .....</b>	<b>49</b>
3.3	DESENVOLVIMENTO DO LABORATÓRIO VIRTUAL.....	51

3.3.1	Procedimentos e cálculos hidráulicos.....	51
3.3.2	Equações das curvas das bombas.....	54
3.3.3	Otimização das curvas do processo de bombeamento.....	55
3.3.4	Calibração dos parâmetros do experimento real.....	57
3.3.5	Definição das pressões no escoamento .....	58
3.3.6	Simulação da cavitação .....	58
3.4	AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PROGRAMA .....	59
3.4.1	Princípios e hipóteses do teste estatístico de médias.....	60
3.4.2	Definição de intervalos de confiança e teste de hipótese .....	61
3.4.3	Análise de desempenho dos estudantes.....	62
3.4.4	Análise opinativa dos estudantes.....	62
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
4.1	MEDIÇÕES E CÁLCULOS PRELIMINARES .....	64
4.1.1	Medições de pressão e potência do experimento real .....	64
4.1.2	Calibração dos parâmetros do experimento real.....	65
4.1.3	Otimização das curvas das bombas reais .....	69
4.2	O LABORATÓRIO VIRTUAL .....	73
4.2.1	Módulo de configuração do circuito (válvulas).....	76
4.2.2	Módulo de bombeamento.....	77
4.2.3	Módulo de cavitação .....	80
4.3	ANÁLISE DA VIABILIDADE DO PROGRAMA.....	84
4.3.1	Análise de desempenho dos estudantes.....	85
4.3.2	Aplicação de fator corretivo para a análise de desempenho.....	90
4.3.3	Análise opinativa dos estudantes .....	92
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	95
5.	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE A – Dados coletados para a bomba individual 1 .....</b>	<b>109</b>

<b>APÊNDICE B – Dados coletados para a bomba individual 2 .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE C – Dados coletados para a associação em série .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE D – Dados coletados para a associação em paralelo .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE E – Desempenho na atividade avaliativa do experimento de bombeamento</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE F – Desempenho na atividade avaliativa do experimento de perda de carga</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE G – Questionário de aceitação referente ao experimento real.....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE H – Questionário de aceitação referente ao laboratório virtual.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE I – Respostas ao questionário do experimento real .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE J – Respostas ao questionário do laboratório virtual.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO A – Especificações das bombas utilizadas no experimento real.....</b>	<b>122</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A Hidráulica é uma área da Engenharia presente em diversos setores da sociedade, como saneamento, instalações prediais e geração de energia (TSUTIYA, 2013). O ensino de suas aplicações é um desafio para boa parte dos profissionais docentes da área, que buscam transmitir, de alguma forma, a ciência a ser transformada em prática (CHANSON, 2004). Portanto, a partir da evolução dos anos, o uso da tecnologia tem sido cada vez mais presente em sala de aula, de forma a instigar novas formas de aprendizados aos estudantes (COLL, 2013).

A utilização da informática na educação teve início principalmente na década de 70, em diversos âmbitos e níveis (GAO et al., 2011). O ensino de Engenharia voltado para obras e construções passou por diversas alterações desde então e tem sido alvo de discussão para os profissionais das disciplinas relacionadas (POPESCU, 1987). Por se pensar cada vez mais na participação ativa do aluno (FOX, 1983), a adoção de novos recursos acaba por impulsionar o aprendizado e melhorar a formação dos futuros profissionais (LEUNG; WANG; CHAN, 2017).

Dentre as tecnologias aplicadas, podem-se citar os laboratórios virtuais (YARBROUGH; GILBERT, 1999). Com recursos multimídia e interação com o usuário, os mesmos têm a vantagem de permitir modificações inviáveis em um laboratório real e de não dependerem de espaços físicos ou limite de tempo (NEDIC, 2003). São capazes de ativar partes do cérebro decisivas para a aprendizagem, pois incentiva o aluno a ver e a fazer (HANSEN, 1990).

A utilização dos laboratórios virtuais pelos estudantes atende às necessidades do mercado, pois confronta aos futuros profissionais, um contato com simulações práticas, em contrapartida ao que é apresentado em classe, com predomínio de teorias e deduções de fórmulas (NEUPAUER; DENNIS, 2010). A Engenharia Hidráulica exige um contato prático, cujos experimentos, reais ou virtuais, podem fornecer antes da entrada dos estudantes no mercado de trabalho (GAO et al, 2011). Atrair ambos em um conjunto único pode fornecer vantagens suficientes para evoluir o aprendizado (NEDIC, 2003).

Atualmente, na área de Engenharia, os laboratórios virtuais são aplicados principalmente na recriação de circuitos elétricos ou eletrônicos (HODGE; HINTON; LIGHTNER, 2001). Por permitir aos estudantes a manipulação da estrutura dos circuitos, os mesmos adquirem uma visão melhorada do processo (MOSTERMAN et al., 1994). Realizando um paralelo

com as disciplinas voltadas à Hidráulica, programas didáticos no computador podem facilitar a compreensão de circuitos hidráulicos, melhorando a sua visualização (GAO et al., 2011).

A partir da necessidade crescente de evolução das tecnologias aplicadas no ensino de Engenharia (KANG et al., 2013), esse trabalho busca a criação de um laboratório virtual de bombeamento, abordando temas como cavitação, associação, curvas características e manipulação do circuito. O protótipo simula um experimento físico já existente, presente no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos experimentos laboratoriais realizados durante as aulas.

A elaboração de um laboratório virtual de sistemas de bombeamento tem como finalidade o auxílio aos estudantes na visualização de um experimento real. Além disso, dá a possibilidade de o aluno trabalhar com circuitos hidráulicos sem tempo ou espaço físico limitados. Por ser um programa de computador, pode disponibilizar alternativas não possíveis num laboratório físico, como manipulação da posição dos equipamentos, tipo de tubulação dentre outros. Além disso, busca integrar as disciplinas de Hidráulica (ENS5101) e Hidráulica 1 (ENS7008), como parte da busca de novas metodologias ativas no ensino.

A pesquisa tem como justificativa preencher as lacunas que um experimento real possui, como espaço, tempo e estrutura. Apenas o laboratório físico possui restrições, dependentes, inclusive, das particularidades e personalidades de cada estudante (FREITAS, 2013).

A criação do laboratório virtual se torna parte integrante das pesquisas realizadas no LabHidra, sob a coordenação da professora Nadia Bernardi Bonumá. O projeto é pioneiro no PPGA, com relação ao estudo da amplificação de metodologias de ensino de engenharia. O grupo, além das atividades científicas, passou a ter como objetivo, a partir dessa pesquisa, buscar novos métodos de inserção tecnológica na docência.

## 1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta Dissertação.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver, implementar e avaliar um laboratório virtual para o ensino de Hidráulica, com a finalidade de promover uma com-

preensão global do processo por parte dos alunos e uma melhora nas metodologias de ensino de Engenharia.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, destacam-se:

- i) Promover a calibração e validação de um modelo de simulação de um experimento real, com a finalidade de representar o laboratório real com a maior fidelidade possível;
- ii) Desenvolver um laboratório virtual para o ensino de Hidráulica, baseado em um protótipo existente, com a finalidade de aplicação aos alunos em complemento ao experimento real;
- iii) Analisar a influência do uso do laboratório virtual na melhora do desempenho dos alunos acerca do conteúdo explanado, com a finalidade de verificar a viabilidade da aplicação do mesmo.

Hipótese: A utilização de um laboratório virtual contribui para uma maior aprendizagem dos estudantes e uma maior visão prática dos processos de engenharia..

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Hidráulica é um segmento da Engenharia que busca avaliar os processos hidrostáticos e hidrodinâmicos da água. O ensino adequado dessa área é fundamental para os alunos de Engenharia Sanitária e Ambiental, Engenharia Civil e Engenharia de Produção Civil obterem bons desempenhos práticos na vida profissional

Nesta seção, serão discutidos temas como a própria Hidráulica Aplicada, a criação de modelos relacionados, além do próprio ensino de Engenharia e de Hidráulica.

No primeiro tema, serão abordados tópicos referentes à Hidráulica Aplicada, voltados aos sistemas de bombeamento. Serão mostradas pesquisas acerca da temática, discutidos conceitos como as curvas características e o processo de cavitação, envolvidos no laboratório virtual.

No segundo tema, será analisado o processo de modelagem e sua evolução através dos anos, incluindo os métodos de otimização necessários para a criação de um laboratório virtual. A regressão é fundamental para a construção das curvas características e as metodologias de obtenção dos parâmetros é de extrema relevância para a simulação do experimento real com a maior fidelidade possível.

Por fim, será discutido o ensino de Engenharia, as diferentes formas de aprendizagem e a aplicação da tecnologia na educação. Serão mostrados trabalhos acerca da construção de laboratórios virtuais e estudos da influência da informática no desempenho dos estudantes.

### 2.1 HIDRÁULICA APLICADA

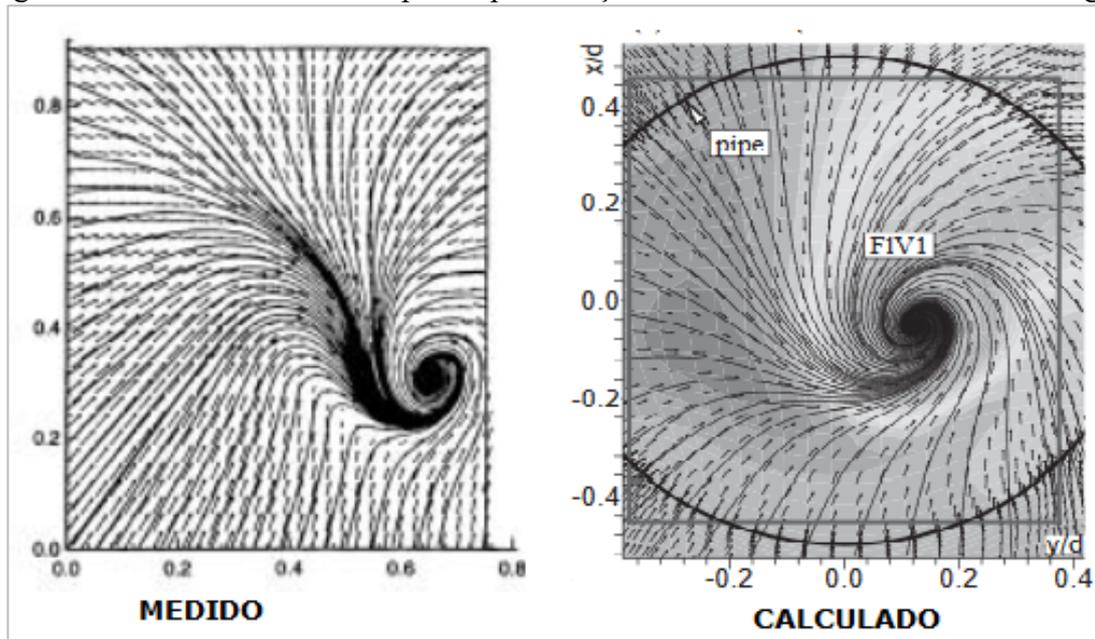
O uso de sistemas hidráulicos está presente em tubulações prediais, como sistemas de água fria e quente (CARVALHO JUNIOR, 2017); além de projetos de abastecimento de água (TSUTIYA, 2013); de canais pluviais e fluviais (NETTO; FERNÁNDEZ, 1998); e estruturas hidráulicas como barragens para contenções de cheias (VOLPI et al., 2018).

A Hidráulica Aplicada ou Hidrotécnica possui várias áreas de atuação, desde a área urbana e rural (NETTO; FERNÁNDEZ, 1998). Em localidades isoladas e rurais, a irrigação e o abastecimento de água são fundamentais para a continuidade da produtividade agrícola e da proteção da agricultura familiar (FOSTER; BROZOVIĆ; BUTLER, 2014). Nas áreas urbanas, sistemas de bombeamento são responsáveis pelo fornecimento de água para as residências prediais e para os reservatórios de abastecimento (TSUTIYA, 2013).

Em localidades cujo abastecimento e tratamento de água é caro e vulnerável à poluição, vale-se a soluções alternativas de sistemas hidráulicos e de bombeamento. Cant (1996) realizou uma pesquisa nas pequenas Ilhas Bahamas, verificando a influência da contaminação da água no suprimento de recursos hídricos, propondo uma legislação de controle mais árdua. Para comunidades isoladas e afastadas, muitas vezes, os sistemas de bombeamento fotovoltaico são soluções para um suprimento adequado de recursos hídricos (SETIAWAN et al., 2014).

Li et al. (2004) avaliaram a utilização do modelo CFD para simular o fluxo de água em vórtices da zona de sucção de bombas. Os autores registraram e modelaram a formação dos vórtices, registrando uma excelente concordância entre o modelo e os resultados experimentais (Figura 1). A verificação do comportamento da água é uma das aplicações inerentes à Hidráulica Aplicada.

Figura 1 – Uso do modelo CFD para representação do vórtice de uma bomba centrífuga.



Fonte: traduzido de Li et al. (2004).

A modelagem é importante para a reconstrução de experimentos e simulações. Para este projeto, foca-se na relevância dos sistemas de bombeamento e nas possibilidades de recriá-los através de programas de computadores.

Os sistemas de bombeamento compreendem estruturas hidráulicas capazes de recalcar a água para alturas mais elevadas, fornecendo-lhes uma carga hidráulica suficiente para

superar as perdas de carga e a diferença de cota geométrica (TSUTIYA, 2013). Dentre as bombas mais utilizadas para processos de instalações hidráulicas, destacam-se as centrífugas.

As bombas centrífugas são muito usadas, devido à capacidade de recalcar a água a grandes alturas, dependendo, principalmente, da velocidade do escoamento (NESBITT, 2006). Portanto, seu funcionamento é indicado para sistemas com vazões elevadas, de forma a obter um melhor custo-benefício (LOBANOFF; ROSS, 2013).

Kergourlay et al. (2006) observaram a alteração do desempenho de uma bomba centrífuga hidráulica a partir da adição de lâminas de divisão de desempenho. Os autores utilizaram o método da malha deslizante para modelar o movimento da água no interior do rotor e descobriram que a adição de lâminas aprimora as flutuações de pressão nos ductos adjacentes.

As bombas centrífugas, bem como as demais, são descritas a partir de curvas de funcionamento, como será visto na próxima subseção.

### **2.1.1 Curvas de um sistema de bombeamento**

Para a descrição energética das bombas e a verificação do seu funcionamento, vale-se ater às curvas de funcionamento das bombas, uma representação gráfica e física dos componentes que a definem (PORTO, 2006).

As três principais curvas a serem trabalhadas são: a curva manométrica ou curva característica, que representa a oscilação da carga hidráulica; a curva de potência hidráulica e a curva de rendimento hidráulico (NETTO; FERNÁNDEZ, 1998).

A altura manométrica, corresponde à diferença de carga hidráulica entre a entrada e a saída da estrutura. A potência do escoamento indica a taxa de energia que o mesmo recebe do conjunto moto-bomba. Já o rendimento hidráulico indica o quanto de carga será aproveitada pelo escoamento, em razão do enviado pela bomba (PORTO, 2006).

A análise das curvas de bombeamento, essencialmente a CCB, é fundamental para a seleção da melhor bomba para ser aplicada em um sistema hidráulico (PLANELLS et al., 2006). Os autores desenvolveram um modelo no Excel e no Visual Basic com o objetivo de facilitar a verificação das curvas das bombas, indicando aquela que possui o melhor custo benefício.

Mesquita et al. (2006) analisaram o uso de bombas centrífugas funcionando em velocidade variável; isto é, com o uso de inversores de frequência de forma a ajustar a rotação do conjunto moto-bomba e, por consequência, a CCB. Os autores aplicaram o processo a uma

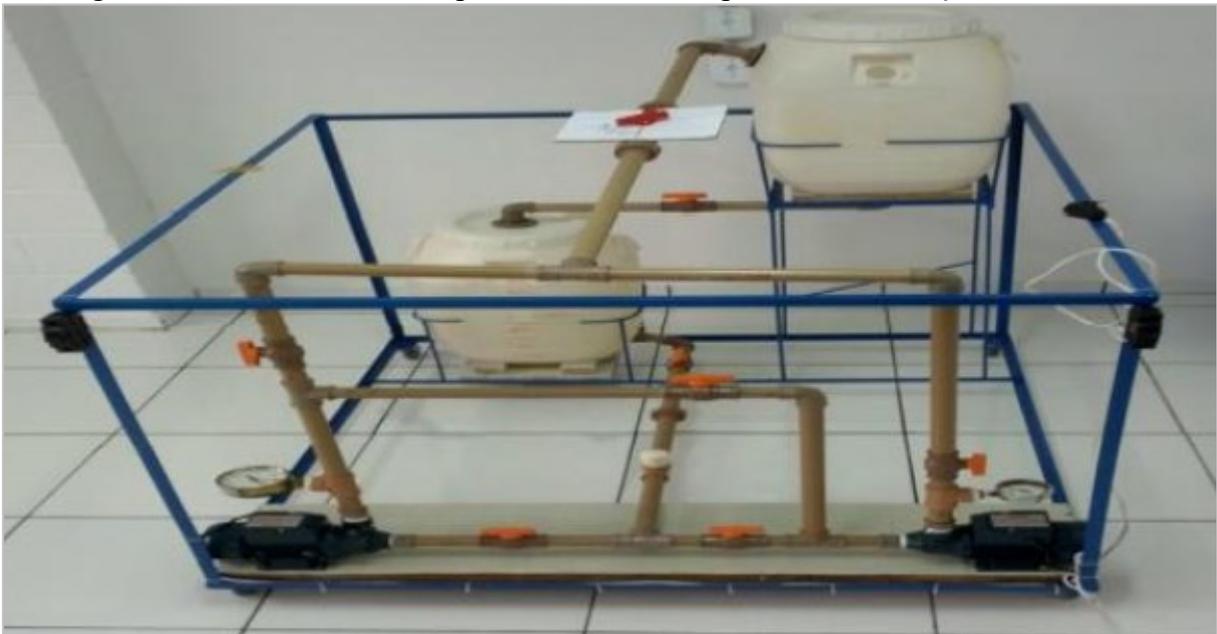
associação de quatro bombas em paralelo, obtendo uma economia de energia de 22,1% ao ano. Concluíram, no entanto, que se deve avaliar o custo inicial do inversor de frequência e sua possível manutenção para verificar o melhor custo-benefício.

Carvalho et al. (2008) estudaram o desempenho de um sistema de bombeamento para o recalque de efluentes vindos de um processo de fabricação e processamento de café. Os autores compararam a atividade de uma bomba centrífuga funcionando com água pura com a de uma com água residuária. No último caso, houve uma queda da altura manométrica e rendimento, necessitando de uma potência mais alta de funcionamento.

Em alguns casos, o funcionamento de uma bomba não é o suficiente para o recalque do sistema onde está inserida, exigindo associações (PORTO, 2006).

Nascimento et al. (2013) elaboraram uma bancada (Figura 2) de um circuito hidráulico para a avaliação de ensaios com bombas em série e paralelo. Os autores realizaram medições de pressão, de forma a possibilitar uma futura construção das curvas características. Concluíram que um correto dimensionamento e avaliação das curvas é fundamental para evitar perdas de desempenho hidráulico.

Figura 2 – Bancada elaborada para avaliar o desempenho de associações de bombas.



Fonte: Nascimento et al. (2004).

Araújo (2015) observou as curvas características de associações de bombas centrífugas em série, verificando as vantagens da sua utilização, reduzindo os custos comparando-as com bombas isoladas de maior potência.

Teixeira (2017) estudou o funcionamento de bombas fotovoltaicas no abastecimento de pequenas comunidades. O autor desenvolveu um modelo numérico, a partir de regressão linear e não linear, para determinar a relação entre a vazão real de bombeamento com vazão contida na CCB, de acordo com a insolação. Foi constatado que a descarga final depende da temperatura, obtendo-se uma redução de vazão de no mínimo 55% na Região de Orleans, em Santa Catarina. Dessa forma, não se recomenda o uso de sistemas de bombeamento fotovoltaico em regiões de baixa insolação, como no Sul do Brasil.

Fatores além da composição do efluente podem determinar o bom funcionamento da bomba (LI; ZHANG. HAMMIT, 1986). Dentre os problemas em sistemas de bombeamento, pode-se citar a presença de ar nos equipamentos, causada pelo fenômeno da cavitação, como será discutido na próxima subseção.

### **2.1.2 Cavitação**

O fenômeno da cavitação se refere à formação de cavidades no interior da tubulação, devido à geração de bolhas de vapor na porção de sucção do escoamento (LI; ZHANG; HAMMIT, 1986). Seu processo pode causar efeitos nocivos como erosão nos tubos e nos rotores das bombas ou turbinas, podendo danificar os equipamentos hidráulicos (HAMMIT, 1975).

A cavitação ocorre quando a pressão absoluta do escoamento se torna baixa o suficiente para ao menos se igualar à pressão de vapor, fazendo com que o líquido entre em ebulição, formando bolhas (PORTO, 2006).

O abaixamento de pressão é decorrente principalmente do uso de bombas não afogadas. Com a cota do equipamento acima do nível do reservatório de sucção, a carga de pressão acaba se tornando tão baixa, que fica inferior à pressão de vapor. Além disso, pode-se citar como causas às perdas de cargas elevadas, nível baixo de funcionamento dos reservatórios de sucção e locais com elevadas altitudes e, portanto, baixa pressão atmosférica (TSUTIYA, 2013).

A pressão de vapor é uma característica que depende da temperatura (Tabela 1), sendo grandezas positivamente proporcionais. Dessa forma, quanto maior a temperatura, mais facilmente o líquido entra em ebulição e maior o cuidado com as perdas de carga na tubulação e com a posição das bombas. Assim, o clima é um fator a ser analisado na projeção de sistemas hidráulicos, principalmente em regiões mais quentes (PORTO, 2006).

Tabela 1 – Relação da pressão de vapor em função da temperatura do escoamento.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão de vapor (mca)</b>
<b>5</b>	0,09
<b>10</b>	0,13
<b>15</b>	0,17
<b>20</b>	0,24
<b>25</b>	0,32
<b>30</b>	0,43

Fonte: adaptado de Porto (2006).

Sabe-se que as turbinas e bombas são componentes fundamentais em estruturas hidráulicas. Garantir seu funcionamento e evitar as instabilidades são de total relevância para evitar danificações no sistema (SOARES; MARTINS; COVAS, 2017). Portanto, vale-se ater a modelos e técnicas de previsão e rastreamento (RAN; LUO, 2018).

Shima (1992) estudou a perda de peso em uma tubulação de aço inoxidável a partir dos efeitos da cavitação. O autor usou um orifício de passagem para induzir o fenômeno e um escoamento com velocidade periférica entre 65 m/s e 78 m/s, como forma de produzir uma elevada perda de carga. Foi constatado que o acréscimo da velocidade periférica tem efeitos diretos na intensificação dos danos.

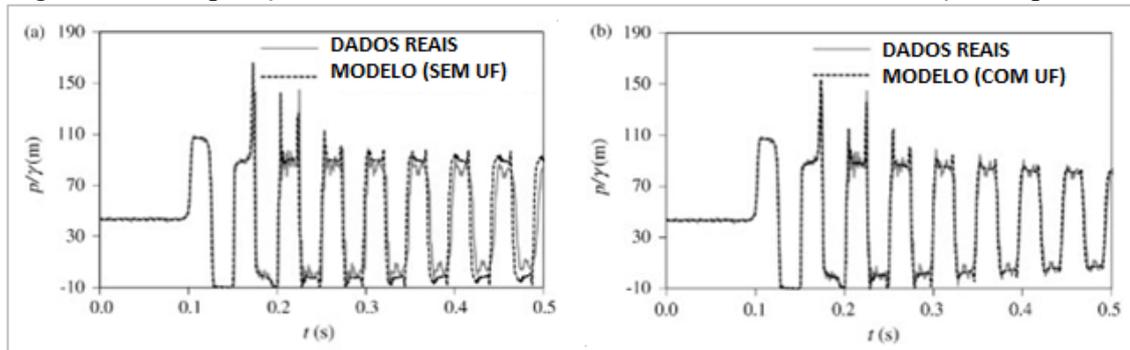
Bajic (2003) observou as causas e efeitos do fenômeno de cavitação em turbinas hidráulicas, a partir da vibração acústica, de forma a facilitar a sua identificação. O autor verificou, através dos ruídos, quatro principais características que permitem uma detecção precoce da ocorrência da cavitação: frequência de ruído, angulação das pás, posição do sensor de vibração e condições operacionais da turbina.

Outros modelos de previsão de cavitação foram desenvolvidos por diversos autores. Alligne et al. (2014) utilizaram um tubo de sucção Francis para observar o fenômeno e verificar sua ocorrência. Os autores avaliaram que a oscilação do fluido pode impulsionar o processo de formação de bolhas, enquanto que a dissipação de energia devido à dilatação pode contribuir para um aumento do volume de dilatação.

Soares, Martins e Covas (2017) estudaram o fluxo de cavitação no interior de um tubo de cobre, através da análise da perda de carga no sistema pelo atrito. A pressão no tubo foi rastreada através de um fechamento de duas válvulas para gerar a descarga e promover as

perdas de energia. Ao considerar um modelo de instabilidade de atrito (UF), os autores obtiveram uma redução de aproximadamente 50% do RMSE, ao simular a cavitação (Figura 3).

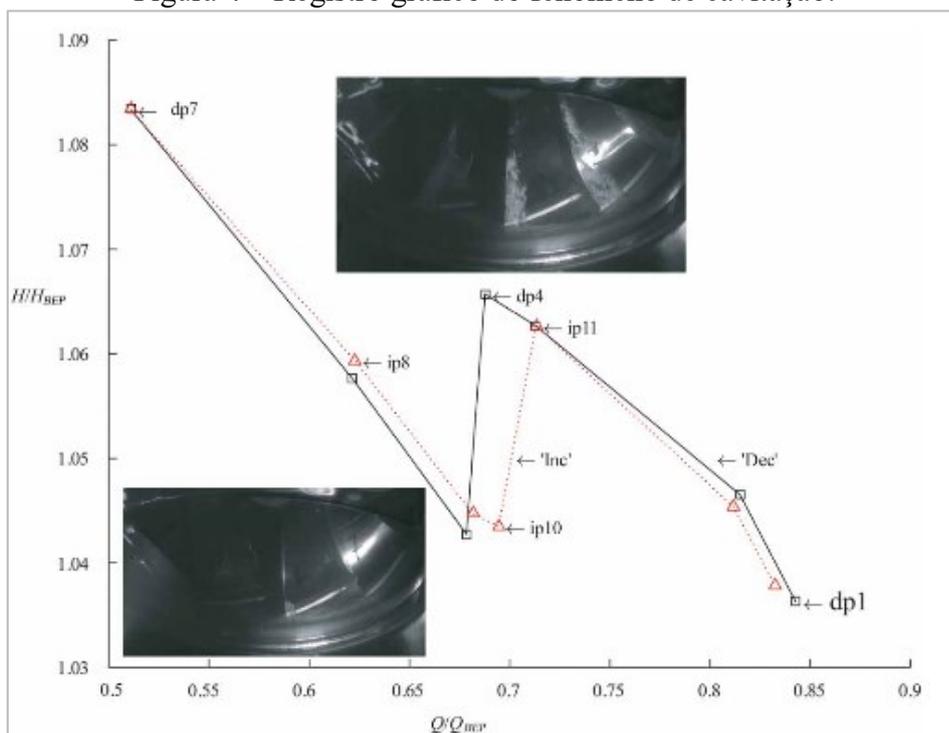
Figura 3 – Comparação do modelo UF na aderência dos dados de simulação de pressão.



Fonte: traduzido de Soares, Martins e Covas (2017).

Ran e Luo (2018) investigaram as instabilidades de estruturas hidráulicas de recalque e a ocorrência de cavitação. Os autores utilizaram um experimento com uma bomba com turbina de nove lâminas e 20 portinholas, usando sensores de pressão e frequência. Para o rastreamento da cavitação, foi necessária uma cinematografia de alta velocidade perto da entrada da turbina (Figura 4).

Figura 4 – Registro gráfico do fenômeno de cavitação.



Fonte: Ran e Luo (2018).

Através da Figura 4, pode-se observar a mudança de ocorrência da cavitação segundo a oscilação da carga hidráulica e da vazão. O fenômeno acaba por com a geração de alguns vórtices de alta velocidade (RAN; LUO, 2018).

Para a representação adequada de sistemas de reais, como os de bombeamento, é necessária uma modelagem para rastrear os parâmetros com o menor erro possível, como será discutido na próxima seção.

## 2.2 MODELAGEM DE PARÂMETROS

A modelagem é um processo pelo qual se busca uma representação simplificada da realidade, adequando-se os seus fatores (parâmetros) de forma a apresentar o menor erro possível (WERNER; LAMBERT, 2007). Modelos podem ter diferentes graus de complexidade, dando respostas a diversos fenômenos (VRUGT et al., 2008). Sobretudo, deve-se ater que nenhuma simulação é perfeita, tendo-se erros em todos os processos, desde a própria coleta dos dados até a simplificação da realidade e ocultamento dos parâmetros (OLIVEIRA, 2018).

Modelos podem ser baseados em dados ou em processos de simulação (VOLPI et al., 2018). No primeiro caso, pode-se aplicar estudos em pequenos protótipos ou regiões, obtendo-se uma avaliação conceitual e empírica (WANG, 2017). Já no segundo, há a vantagem de simular os mecanismos e observar os efeitos do evento pesquisado, apesar de não trabalharem bem com generalizações (VOLPI et al., 2018).

A aplicação de um modelo matemático requer a determinação dos parâmetros, conhecida como calibração do modelo. Em geral, o princípio mais utilizado para a construção dos métodos de modelagem é o de otimização, reduzindo a distância do que foi simulado para o que existe na realidade (DAYARATNE; PERERA, 2004). Dentre os métodos de otimização, pode-se buscar os de rastreamento local ou global (VRUGT, 2016), como serão vistos nas próximas subseções.

### 2.2.1 Métodos de otimização local

A otimização é um processo pelo qual o modelo busca se aproximar da realidade, com um resíduo minimizado (VRUGT, 2016). No entanto, dependendo do processo, a otimização acaba por convergir para um mínimo local e não global (TÔRN; ŽILINSKAS, 1989), produzindo um resultado que, talvez, não seja o mais eficaz possível (VRUGT et al., 2008).

Muitas funções são utilizadas como treinamento de métodos de otimização, como a Rosenbrock, que utiliza vários pontos distintos de possível convergência para treinar modelos (BOX, 1965). Métodos como algoritmos genéticos, estes globais, podem ser fundamentais para resolver problemas com muitos parâmetros e de forma adquirir modelos finais com resíduos cada vez menores (KANG; LI; MA, 2011).

Dentre os métodos mais simplificados de otimização local, pode-se citar a regressão linear, no qual os parâmetros são obtidos por ajuste de curvas, minimizando o resíduo médio quadrático (DISKIN, 1970). Este procedimento depende de um conhecimento da equação do processo e do cálculo das derivadas ou gradientes das funções envolvidas (HEUVELMANS; MUYS; FEYEN, 2006).

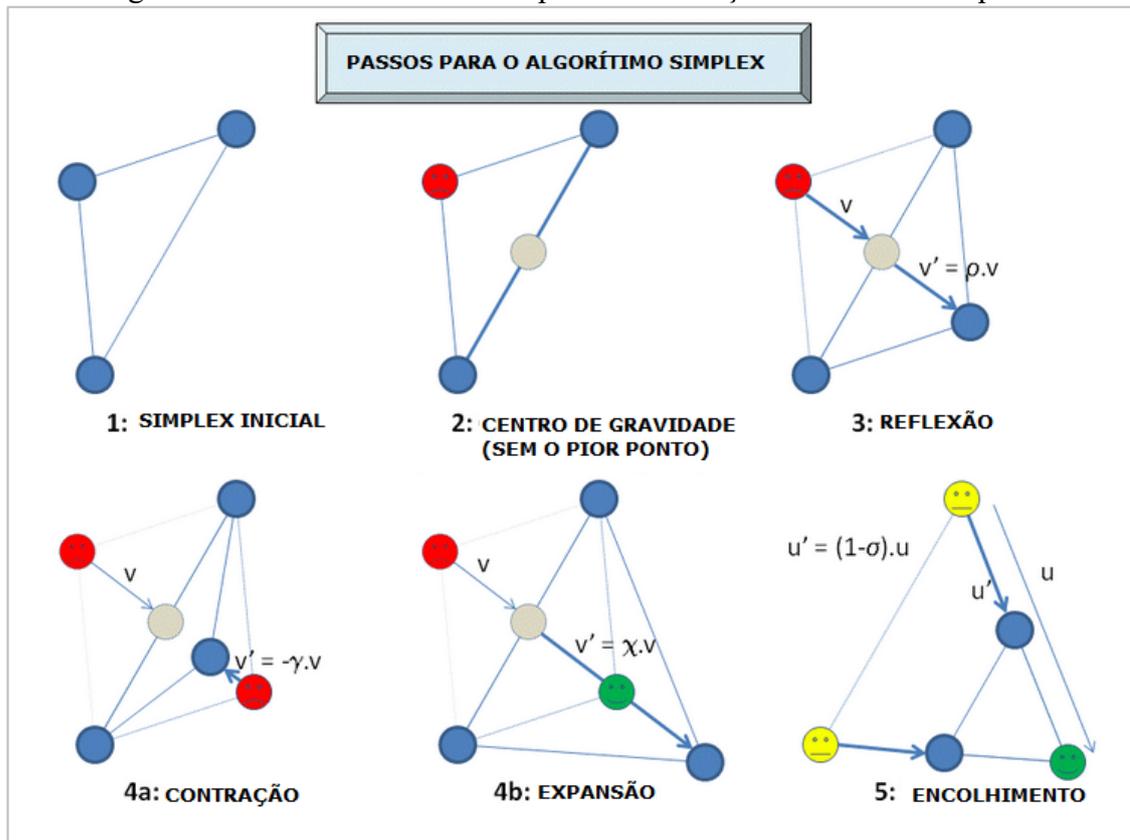
A regressão linear possui a vantagem de não necessitar de iterações ou convergências; de possuir agilidade ao trabalhar com funções simples e de requerer pouco custo computacional (JOSHI et al., 2013). Entretanto, o método exige o uso de funções pouco complexas e de possível derivação (ZHU et al., 2017).

Para as regressões não lineares, com uma necessidade de aprimoramento dos cálculos, destaca-se o método de Newton (MOHSENI; STEFAN; ERICKSON, 1998). Nesse procedimento, adotam-se pontos iniciais, utilizando a derivada ou gradiente para chegar a outro ponto até convergir para um mínimo estabelecido (COOLEY, 1982). Possui a desvantagem de se aproximar de mínimos locais e de necessitar do conhecimento da derivada ou gradiente das funções em questão (COOLEY, 1985).

Procedimentos que não necessitam de gradiente ou do conhecimento da função foram desenvolvidos para situações mais abstratas ou com causas desconhecidas ou complexas. Dentre os que ainda convergem para os mínimos locais, pode-se citar o *Nelder-Mead Simplex Method*, ou simplesmente Simplex. Esse método tem a vantagem de não depender de um conhecimento prévio e físico do comportamento da função, avaliando apenas os resíduos. (FREY et al., 2014)

O método Simplex consiste na verificação dos resíduos em três diferentes pontos iniciais, determinados de forma randômica. A cada iteração, busca-se substituir o ponto de pior resultado (mais distante da medição real), por um outro, usando processos de rebatimento geométrico (Figura 5). Os métodos de rebatimento podem ser feitos por contração, expansão, reflexão ou encolhimento, seguindo essa sequência, impreterivelmente (LAMBOT et al., 2002).

Figura 5 – Passos a serem usados para cada iteração do Método Simplex.



Fonte: traduzido de Capsis (2013).

Todos os métodos discutidos nessa subseção tendem a convergir a mínimos locais. Outros procedimentos foram desenvolvidos, buscando evitar essas situações e otimizar ainda mais os resíduos, como será visto a seguir.

### 2.2.2 Métodos de otimização global

Os métodos de otimização global se diferem dos locais porque buscam valores minimizados considerando uma função como um todo, desconhecida ou não (TÔRN; ŽILINSKAS, 1989). Dentre os procedimentos conhecidos, destacam-se duas categorias: estocástica e heurística. Assim, diferem-se dos métodos de rastreamento local, normalmente determinísticos.

Os métodos estocásticos ou probabilísticos são baseados em eventos aleatórios, que independem do acontecimento anterior (ABBASZADEH; MORADKHANI; YAN, 2018). Se atêm a funções de probabilidade para prever novos pontos a partir de uma função conhecida, sem a necessidade do cálculo de derivadas ou gradientes (VRUGT, 2016).

Dentre os procedimentos probabilísticos, podem-se destacar as cadeias de Markov, que se baseiam na geração de uma distribuição de probabilidade independente para cada ponto (KEMENY, 1976).

Outro procedimento probabilístico é o modelo GLUE. O método consiste, em suma, na geração aleatoriamente controlada dos parâmetros em um determinado intervalo pré-estabelecido, baseado em conhecimentos físicos. Após um número de iterações, analisa-se o conjunto de parâmetros que obteve a melhor representatividade com relação a uma situação. A representatividade é dada através de funções objetivo, como RMSE e NSE (BEVEN; BINLEY, 1992).

O modelo GLUE tem como vantagem e desvantagem avaliar valores em todo o intervalo pré-estabelecido para os parâmetros e não seguir tendências de convergência. Como os valores são gerados aleatoriamente, independente do passo anterior, não há atração para mínimos locais. Entretanto, como não há convergência, deve-se realizar uma quantidade muito grande de iterações, de forma a se garantir uma alta probabilidade de atingir um mínimo global (ROMANOWICZ; YOUNG, 2003).

Dentre outros métodos de otimização, destacam-se os heurísticos, utilizando algoritmos que carregam informações dos valores anteriores, melhorando-os a cada iteração (STORN; PRICE, 1997). Surgem, portanto, os procedimentos evolucionários, como o algoritmo genético (MITCHELL, 1998).

O algoritmo genético utiliza práticas da evolução e reprodução para a geração dos novos valores (HAUPT; HAUPT, 2004). Seguindo o princípio dos cromossomos, os valores novos, conhecidos como células filhas, agregam valores relacionados aos pais, como um comando genético (GEN; CHENG, 2000). Em contrapartida, alguns dos filhos serão descartados pelos seus valores menos aceitáveis, seguindo o princípio da seleção natural (KOZA, 1992).

A modelagem acaba por ser um papel fundamental no desenvolvimento de protótipos, utilizados no ensino de Engenharia, como será visto na próxima seção.

### 2.3 ENSINO DE ENGENHARIA

A Engenharia consiste na aplicação de diversas ciências no mundo real. Portanto, os estudantes dos cursos relacionados a essa área devem ser capazes de visualizar os problemas e familiarizarem-se com suas possíveis soluções (CHANSON, 2004). Aplicações, contato

com a indústria e com os experimentos são fundamentais para o desenvolvimento do futuro profissional (POPESCU, 1987).

Para compreender o processo de ensino de Engenharia, é necessário verificar as diferentes formas e particularidades do próprio processo de educação.

A educação é um processo complexo que envolve uma interação dinâmica entre quatro fatores: professor, estudante, conhecimento e ambiente; e três subprocessos: ensino, aprendizagem e avaliação (LEUNG; WANG; CHAN, 2007). É preciso compreender a variedade existente entre todos os elementos apresentados para a construção de um ambiente sólido e satisfatório (ENTWISTLE; RAMSDEN, 2015).

Há diferentes formas qualitativas de aprendizagem dos alunos, que dependem do contexto onde cada um está inserido, das particularidades e personalidades individuais (BIGGS, 1987). As características próprias do indivíduo acabam por influenciar inclusive na progressão de carreira na área de Engenharia (FRASER, 2000), segundo os próprios objetivos dos estudantes (LEUNG; NG; LI, 2004). Pensar de forma global, atendendo às diferentes maneiras de entendimento, acaba por melhorar o processo educacional e conquistar desempenhos mais efetivos, tanto profissionalmente, quanto academicamente (LEUNG; WANG; CHAN, 2007).

No ensino de Hidráulica, os cursos em sala de aula normalmente estão restritos a situações envolvendo questões simplificadas e deduções analíticas de equações, baseadas na Mecânica dos Fluidos (CHANSON, 2004). A visualização de experimentos e problemáticas reais em laboratório já acaba por melhorar os processos cognitivos dos alunos e amplificar seus desempenhos (NEUPAUER; DENNIS, 2010).

Apesar do aprimoramento na visualização dos aspectos com os experimentos reais, os laboratórios existentes exigem que os alunos sigam um procedimento padrão, sem tantas possibilidades de trabalhar com os equipamentos ou se expandir no conteúdo (CHAN et al., 2008). Dessa forma, alternativas como laboratórios virtuais se tornam uma boa solução para a melhora da visualização, permitindo a chance de os estudantes manipularem os processos e chegarem às suas próprias conclusões (KANG et al., 2013).

O processo educacional, não tão somente o ensino aplicado à Engenharia, apresenta diferentes formas de ensino e aprendizagem, como será discutido nas próximas duas subseções.

### 2.3.1 Abordagens de aprendizagem

Há três diferentes abordagens principais de aprendizagem: superficial, profunda e de resultado (BIGGS, 1992). Os processos escolhidos, conscientemente ou não, influenciam tanto estudantes, quanto lecionadores; o que pode gerar diferentes performances das classes e dos profissionais que se formarão (LEUNG et al., 2008).

A abordagem superficial é baseada na reprodução de conceitos e repetições, buscando-se o caminho menos árduo para a obtenção dos resultados (BIGGS, 1987). A abordagem profunda envolve uma participação ativa do aluno no processo de aprendizagem, com o mesmo não sendo apenas um objeto, mas também um protagonista (GOMES, 2011). Por fim, a abordagem de resultado é baseada na competição entre os estudantes e aprimoramento do próprio ego (ENTWISTLE; RAMSDEN, 2015).

As diferentes abordagens foram resumidas por Leung, Wang e Chan (2007), descrevendo os motivos e estratégias relacionados a cada uma (Quadro 1).

Quadro 1 – Características das diferentes abordagens de aprendizagem.

<b>Abordagem</b>	<b>Superficial</b>	<b>Profunda</b>	<b>Resultado</b>
<b>Motivo</b>	Obtenção de aprovação com o mínimo esforço.	Envolvimento profundo com a matéria.	Obtenção das melhores notas.
<b>Estratégia</b>	Cortar obstáculos para conseguir aprovação.	Conceituar a aprendizagem.	Usar macetes e habilidades de estudo.

Fonte: adaptado e traduzido de Leung, Wang e Chan (2007).

A abordagem superficial é focada em processos de memorização e reprodução de detalhes, sem o conhecimento amplo do mesmo (GOMES, 2011). Está focada na aquisição de nota suficiente para a obtenção de aprovação, sem a necessidade de se aprofundar nos conteúdos lecionados (BIGGS, 1987). Dessa forma, o estudante é meramente um indivíduo passivo no processo de aprendizagem, apenas transcrevendo o que lhe é passado (LEUNG; WANG; CHAN, 2007).

A abordagem profunda é normalmente associada a resultados de aprendizagem de alta qualidade, buscando-se alcançar um sucesso e não simplesmente evitar o fracasso (BIGGS, 1992). Nesse caso, se exploram as relações entre os conteúdos, buscando-se uma motivação satisfatória (KEMBER, 2000).

A abordagem de resultados, devido à sua diferente motivação, tem mais efetividade ao adquirir resultados marcantes em concursos e premiações, mas falha ao promover uma compreensão global dos conteúdos (LEUNG; WANG; CHAN, 2007).

Chin e Brown (2000) realizaram um estudo comparativo entre os resultados e desempenhos de alunos de oitava série (nono ano atualmente) que utilizam aprendizagem profunda contra os que usam a superficial. Através de testes aplicados, foi constatado que os estudantes com desenvolvimento profundo conseguiam contextualizar mais as teorias e expor suas ideias de forma espontânea e elaborada. Já os superficiais respondiam os questionamentos reformulando perguntas, como uma “caixa preta”. Por fim, sugeriram que é papel do professor incentivar e trabalhar para que haja um trabalho mais aprofundado e não somente raso.

Hall, Ramsay e Raven (2004) defendem que é dever do educador incentivar uma abordagem profunda e promover mecanismos para reduzir a aprendizagem superficial. Os autores fizeram um estudo com a introdução de atividades em grupo no ambiente acadêmico, de forma a melhorar os resultados. Foi verificado que houve uma sensível melhora no aprofundamento, ainda que não significativa.

English, Luckett e Mladenovic (2004) realizaram um estudo sobre a intervenção de professores na aprendizagem dos alunos, através de novas atividades e dinâmicas em sala. Os autores observaram uma melhora significativa nos resultados de estudantes de contabilidade submetidos a tais mudanças. Dessa forma, concluíram que os professores podem e devem manipular a forma como os alunos realizam e idealizam sua própria atividade.

Compreender os diferentes métodos de aprendizagem é fundamental para discutir as metodologias de ensino, conceituando-se o papel do professor na educação. É necessária uma relação entre os dois processos para obter um resultado mais expressivo. As diferentes teorias de ensino serão discutidas na próxima subseção.

### **2.3.2 Teorias de Ensino**

Há duas principais teorias de ensino aplicadas: a simples e a desenvolvida (FOX, 1983). As teorias são baseadas no centro gravitacional do processo de aprendizagem, seja no professor (simples) ou no aluno (desenvolvida). As diferentes formas implicam em consequências distintas e se relacionam com os objetivos e as particularidades de cada estudante (LEUNG; WANG; CHAN, 2007).

Na teoria simples, focada no professor, o conhecimento é visto como um processo de transferência e as aulas, como uma palestra. O transferente, no caso, o docente, busca melhorar suas técnicas e passar a informação da forma mais eficaz possível (FOX, 1983). O conhecimento é transmitido repetidamente até que os resultados pré-estabelecidos sejam alcançados (LEUNG et al., 2008).

Na teoria desenvolvida, o estudante é visto como parceiro no processo de aprendizagem, com uma gama de conhecimentos próprios (FOX, 1983). Nesse caso, o professor é apenas uma ferramenta fundamental para o crescimento interno do aluno e para facilitar a aquisição de ideias e a construção do conhecimento (LEUNG; WANG; CHAN, 2007). No caso, o foco não é somente a transferência de conteúdos e sim uma viagem em conjunto na imersão da disciplina (TRIGWELL; PROSSER; TAYLOR, 1994).

As diferentes teorias de ensino foram resumidas por Leung, Wang e Chan (2007), descrevendo os diferentes métodos e abordagens de cada um (Quadro 2).

Quadro 2 – Características das diferentes teorias de ensino.

<b>Teoria</b>	<b>Método</b>	<b>Abordagem</b>
<b>Simple</b>	Concentrado na transferência de conhecimento. Professores veem os alunos como objetos a serem moldados com um objetivo pré-determinado.	Leituras são para transferência de conhecimento; professores demonstram experimentos e exemplos. Nesse caso, há os laboratórios, trabalhos, estúdios.
<b>Desenvolvida</b>	Professores são guias e estão focados em contribuir para a evolução pessoal dos estudantes e não só na transferência de conhecimento	Professores apoiam, enquanto os estudantes desenvolvem o próprio conhecimento através da discussão em grupo. As respostas não são diretas e os problemas são confrontados e contextualizados.

Fonte: adaptado e traduzido de Leung, Wang e Chan (2007).

Freitas (2012) defende que o ensino tradicional acaba por não promover um desenvolvimento pessoal do aluno. Segundo a autora, o processo de aprendizagem deve se concentrar na problematização, promovendo um conhecimento ativo do estudante. Conclui que uma abordagem com contextualização pode propiciar um melhor resultado, não somente em avaliações, mas para um crescimento pessoal próprio.

Há diferenças, sobretudo, no processo de aprendizagem para cada aluno. Mesmo a teoria desenvolvida de ensino pode não atender aos objetivos (FRIEDMAN; ALLEY, 1984). Deve-se promover o amálgama entre as melhores formas de aprendizagem e ensino e verificar as particularidades dos estudantes (FEIMAN-NEMSER; REMILLARD, 1995).

No contexto aprendido anteriormente, surgem as tecnologias virtuais, como será visto na próxima subseção.

### 2.3.3 Uso de tecnologia e laboratórios virtuais

O avanço das tecnologias na atualidade transformou a sociedade. A sala de aula já é colocada em um outro âmbito, necessitando de novas visões para se adequar à nova realidade, tanto dos alunos, quanto da sociedade (COLL, 2013). Métodos alternativos de ensino emergem, como a sala de aula invertida, que busca dar ao aluno uma participação ativa, seguindo a orientação desenvolvida. Atrelar a tecnologia à participação do aluno é um passo eficaz para o desenvolvimento da própria aprendizagem (SANTOS; NICOLETE; SILVA, 2018).

A criação de laboratórios virtuais, que incluem sistemas multimídias e recursos interativos, são desenvolvidos para reforçar o conhecimento do estudante acerca do aprendizado (YARBROUGH; GILBERT, 1999). Os programas de computadores voltados à docência permitem que o aluno se aprofunde nos experimentos, aprimorando sua participação ativa, segundo uma aprendizagem desenvolvida (KANG et al., 2013).

Em contrapartida aos estudos favoráveis à adoção integral da tecnologia, Nedic (2003) avaliou que os laboratórios virtuais são substitutos pobres dos experimentos reais. O uso de programas aplicados ao ensino deve ser estimulado, mas como complemento aos experimentos reais. O autor ainda cita os programas remotos, que correspondem a experimentos reais, controlados por computadores à distância. Eles possuem particularidades que misturam os dois tipos anteriores (Quadro 3).

Quadro 3 – Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de laboratórios.

Laboratório	Vantagens	Desvantagens
<b>Real</b>	Dados realísticos, interação com equipamentos reais, trabalho em conjunto, interação com supervisor.	Restrição de tempo e espaço, caro, requer supervisão e agendamento.
<b>Virtual</b>	Explicar conceitos, sem restrições de tempo e espaço, média interatividade, baixo custo.	Dados apenas idealizados, falta de trabalho em conjunto, sem interação com o equipamento real.
<b>Remoto</b>	Interação com o equipamento real, calibração, dados reais, sem restrição de tempo e espaço, custo médio.	Somente presença virtual no laboratório.

Fonte: adaptado e traduzido de Nedic (2003).

Na literatura, constam-se diversos experimentos com laboratórios virtuais de Engenharia, em diferentes áreas, principalmente em Elétrica e Eletrônica. A necessidade de mostrar diversos circuitos elétricos aos alunos, bem como suas implicações, impulsiona a criação de programas nessas áreas (HODGE; HINTON; LIGHTNER, 2001).

Mosterman et al. (1994) avaliaram a experimentação dos alunos, de forma qualitativa e quantitativa, acerca do uso de um laboratório virtual antes ou depois da experimentação real. Os autores desenvolveram um programa de circuitos eletrônicos equivalentes a um sistema físico existente. Para avaliar a viabilidade do programa, os autores usaram como foco o tempo que cada grupo de estudantes decorria para a realização do experimento real e a necessidade de assistência. Assim, realizaram uma comparação entre aqueles que realizaram o laboratório virtual antes do real com os que usaram depois (Tabela 2).

Tabela 2 – Análise comparativa do tempo de realização de um experimento de eletrônica.

	Uso do		Uso do	
	Laboratório virtual antes		Laboratório virtual depois	
Tempo médio	Realização	Assistência	Realização	Assistência
	(min)	(min)	(min)	(min)
<b>Laboratório físico</b>	46,30	5,90	80,10	14,90
<b>Laboratório virtual</b>	100,30	8,10	80,70	7,10

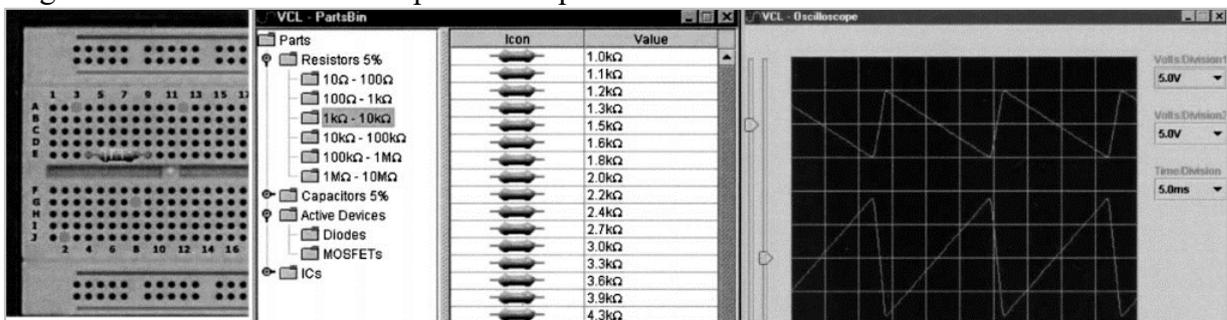
Fonte: traduzido e adaptado de Mosterman et al. (1994).

Como pode ser observado na Tabela 2, houve uma redução no tempo médio total de realização do experimento com a utilização do laboratório virtual antes do real. Corroborando, houve uma menor necessidade de assistência, mostrando as vantagens do seu uso, facilitando o entendimento. Os autores, contudo, não avaliaram o desempenho com relação ao conteúdo e aprendizagem (MOSTERMAN et al., 1994).

Yarbrough e Gilbert (1999) elaboraram um sistema de laboratório multimídia e virtual para a Engenharia Civil, considerando as matérias básicas de cálculo e de construção. A avaliação da viabilidade do programa foi feita através de um questionário de aceitação dos estudantes, verificando a porcentagem de alunos para cada resposta. Os autores não observaram uma melhora significativa das notas, mas houve um juízo favorável dos graduandos.

Hodge, Hinton e Lightner (2001) desenvolveram um sistema virtual de elaboração de circuitos eletrônicos, abordando, inclusive, as falhas reais existentes em um laboratório real. O laboratório está disponível *online* e permite ao usuário a criação de novos modelos, além dos existentes já disponíveis. O uso do programa conseguiu ser satisfatório no auxílio aos alunos no processo de depuração, principalmente porque verifica as falhas existentes do procedimento físico. A interface dos autores contém uma imagem de um aparelho de circuito e das possíveis conexões, além da indicação de resistores e dos resultados finais da oscilação (Figura 6). A qualquer momento, pode-se manipular as válvulas e diversos outros fatores, observando os resultados finais.

Figura 6 – Partes da interface apresentada por um laboratório virtual de circuitos eletrônicos.

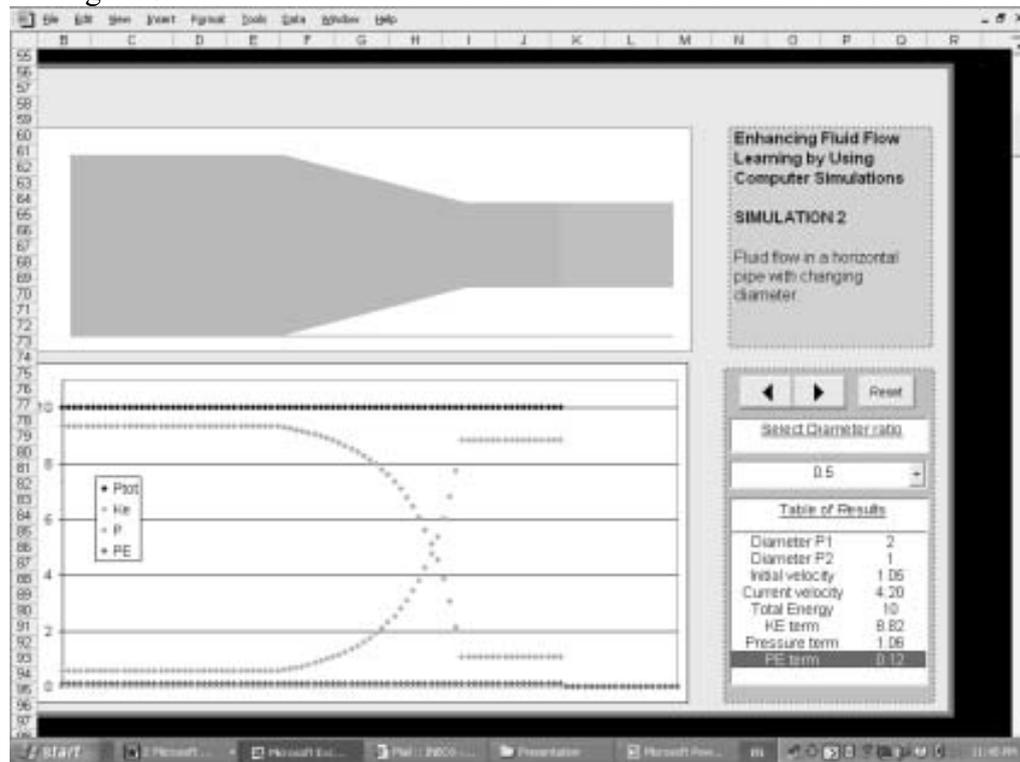


Fonte: Hodge, Hinton e Lightner (2007).

Book, Koeppen e Rouse (2002) elaboraram um laboratório de acesso remoto no Instituto de Tecnologia da Geórgia, em Atlanta, nos Estados Unidos. Com o sistema, os alunos de Mecatrônica possuem acesso a uma interface virtual capaz de controlar à distância um dispositivo hidráulico real, podendo observar os resultados e particularidades. Foram constatados um aprimoramento no ensino e aprendizagem e uma facilidade de verificar o experimento, sem a necessidade presencial. Os módulos remotos, segundo Nedic (2003) misturam as vantagens dos laboratórios virtuais e reais.

Fraser et al. (2007) compararam o impacto das simulações computacionais na compreensão de teoria e prática de Mecânica dos Fluidos através de um laboratório virtual com uma interface considerada simples (Figura 7). Os autores realizaram um questionário antes e depois da exposição de dispositivos de fluidos, avaliando a quantidade de alunos aprovados em cada ocasião. Com cinco conceitos estudados, foi constatada uma melhora significativa em três das cinco temáticas. Os temas que mais apresentaram ganhos foram os de cunho experimental e prático, como perfil de velocidade e de escoamento, chegando a 25,0% e 18,9% a mais de estudantes aprovados.

Figura 7 – Interface de um laboratório virtual de Mecânica dos Fluidos.



Fonte: Fraser et al. (2007).

Gao et al. (2011) avaliaram o desempenho de um laboratório virtual de Engenharia Hidráulica, aplicado em 40 estudantes da graduação. Os autores dividiram os graduandos em dois grupos: aplicação (com laboratório virtual) e controle (sem laboratório virtual). Foi realizada uma avaliação comparativa entre o tempo que cada turma demorou para realizar um pré-teste e um pós-teste (Tabela 3). Por fim, realizou-se uma avaliação qualitativa a partir de um questionário dado aos estudantes.

Tabela 3 – Análise comparativa da realização de testes com ou sem um laboratório virtual.

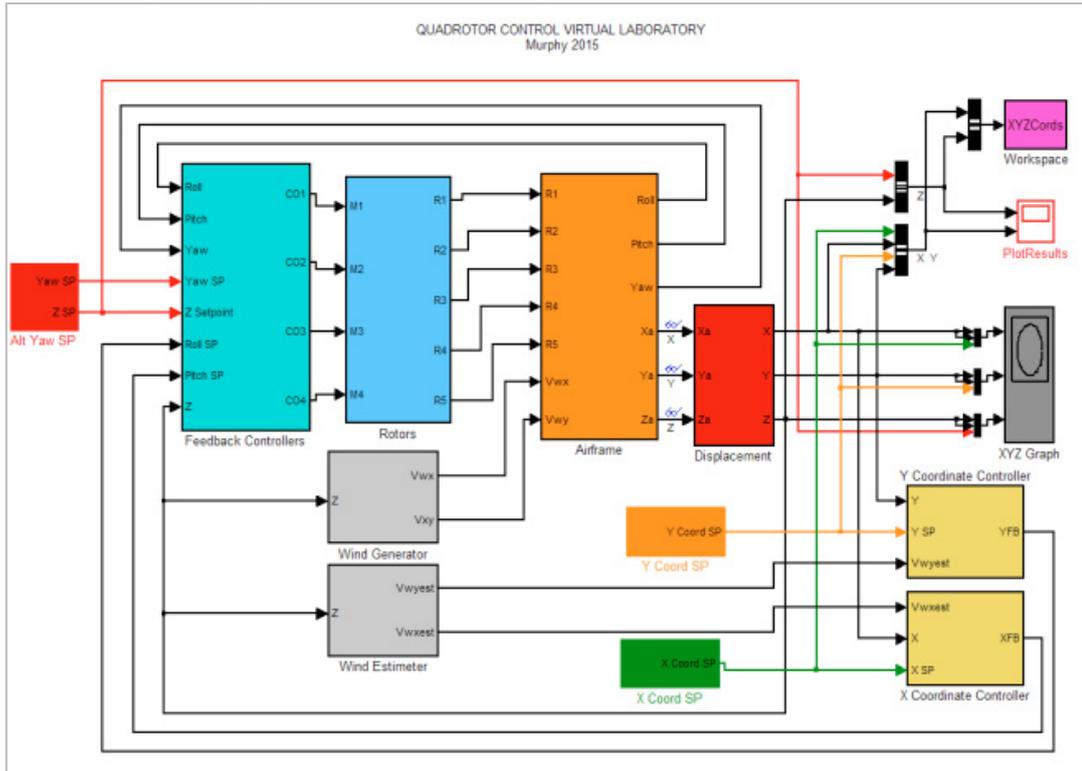
Grupo	Duração média do pré-teste (min)	Duração média do pós-teste (min)
Controle	46,65	48,00
Aplicação	45,88	37,41

Fonte: traduzido e adaptado de Gao et al. (2011).

Os autores observaram que não houve diferenças aparentes entre os grupos no pré-teste (2%). Para o pós-teste, a relação entre as duas turmas encontrada foi em média de 66%. A partir do teste ANOVA, com significância de 5%, constatou-se que é possível afirmar que o grupo de aplicação possui um tempo menor que o de controle, com 0,0775% chances de erro (GAO et al., 2011).

Murphy (2016) avaliou a aplicação de um laboratório virtual de um quadrimotor, buscando uma boa interface estudante-módulo (Figura 8). O protótipo foi modulado para ser usado para vários grupos de alunos, que verificaram sua eficácia. O sistema foi aceito devido à sua boa capacidade de modificações e controle, além de apresentar a interface de forma intuitiva e interativa.

Figura 8 – Representação de um simulador quadrimotor utilizado no ensino de eletrônica.



Fonte: Murphy (2016).

Os laboratórios virtuais citados mostram que há uma necessidade de uma verificação de desempenho dos alunos (análise quantitativa), além de uma própria aceitação (análise opinativa). Por fim, o desenvolvimento de um programa virtual deve contar com uma boa interface e uma densidade adequada de conteúdos, de forma a amplificar os conhecimentos dos alunos, completando o conhecimento obtido no experimento real.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do laboratório virtual de bombeamento, utilizou-se como base o experimento real já existente no Laboratório de Hidráulica (LabHidra) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Ao aplicar o programa como um complemento e não como um substituto, pode-se obter as vantagens dos dois tipos de laboratórios (NEDIC, 2003).

Como primeiro passo para a construção do laboratório virtual, buscou-se analisar o experimento real como um todo, observando os equipamentos, configurações e o procedimento experimental. Para transpor a estrutura para o computador, é necessário conhecer o sistema físico, primeiramente, bem como suas particularidades, para enfim reproduzi-lo e aprimorá-lo com a maior eficácia possível.

Após um balanço do experimento real, elaborou-se uma estrutura do funcionamento do laboratório virtual, observando inicialmente como ele iria suprir as limitações do sistema físico. Por fim, foram definidos os módulos (partes) que compuseram o programa, suas funções e elementos.

Com o laboratório previamente esquematizado, foi possível o seu desenvolvimento em uma linguagem computacional específica. De forma a simular o experimento real, foram obtidos dados experimentais a serem recalculados pelo programa. Para tal, foi necessária a calibração dos parâmetros de rugosidade absoluta e de viscosidade cinemática, tornando os cálculos os mais próximos possíveis da realidade.

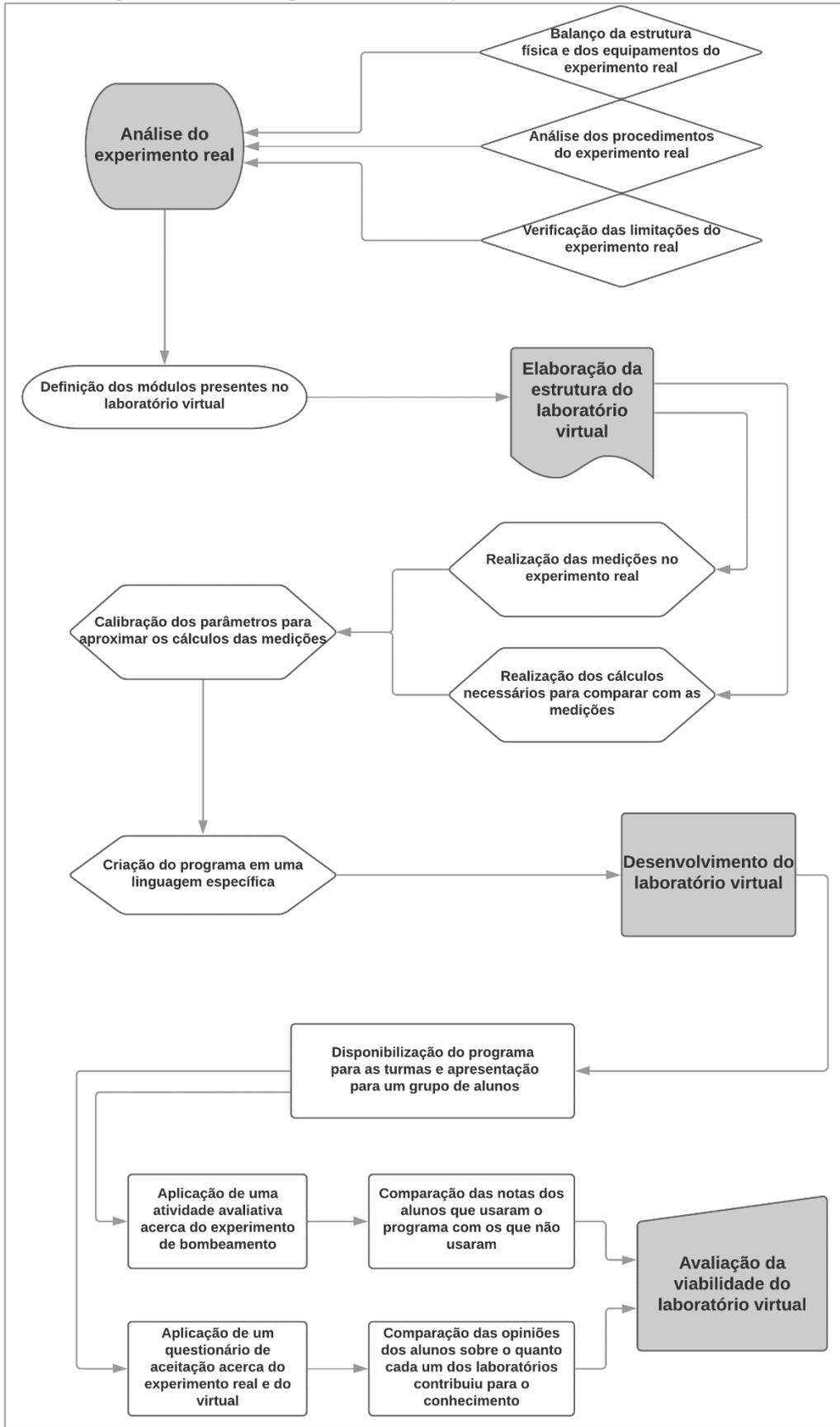
Com o programa pronto, atém-se à necessidade de avaliar sua viabilidade quanto à questão de ensino. Além da relevante aprovação dos alunos, buscou-se observar uma melhora ou não no desempenho dos estudantes, após a aplicação do mesmo.

A análise da eficácia do laboratório virtual quanto ao desempenho se deu por meio da aplicação de uma atividade avaliativa referente ao experimento de bombeamento e cavitação. Com um teste de hipóteses, pôde-se comparar as médias dos alunos que obtiveram contato com o programa, com aqueles que apenas frequentaram a aula do experimento real.

Por fim, observou-se a opinião dos alunos através de um questionário opinativo. Estatisticamente, buscou-se observar uma melhora ou não da aceitação dos alunos, através de testes de hipóteses com relação às respostas dadas.

A estrutura do trabalho pode ser visualizada através de um fluxograma metodológico (Figura 9), que indica os passos para a elaboração de um laboratório virtual.

Figura 9 – Fluxograma metodológico da elaboração do laboratório virtual de bombeamento.



Fonte: autoria própria.

### 3.1 ANÁLISE DO EXPERIMENTO REAL

#### 3.1.1 Localização e estrutura

A estrutura do experimento real está localizada no LabHidra, na UFSC. O sistema foi desenvolvido pela empresa EcoEducativa, como serviço auxiliar à disciplina de Hidráulica I e Hidráulica, ministrada nos cursos de Engenharia Civil, Engenharia de Produção Civil e Engenharia Sanitária Ambiental. O protótipo simula processos de bombeamento e permite a observação do fenômeno de cavitação. O LabHidra ainda conta com outros três experimentos: perda de carga, orifícios e bocais e canais.

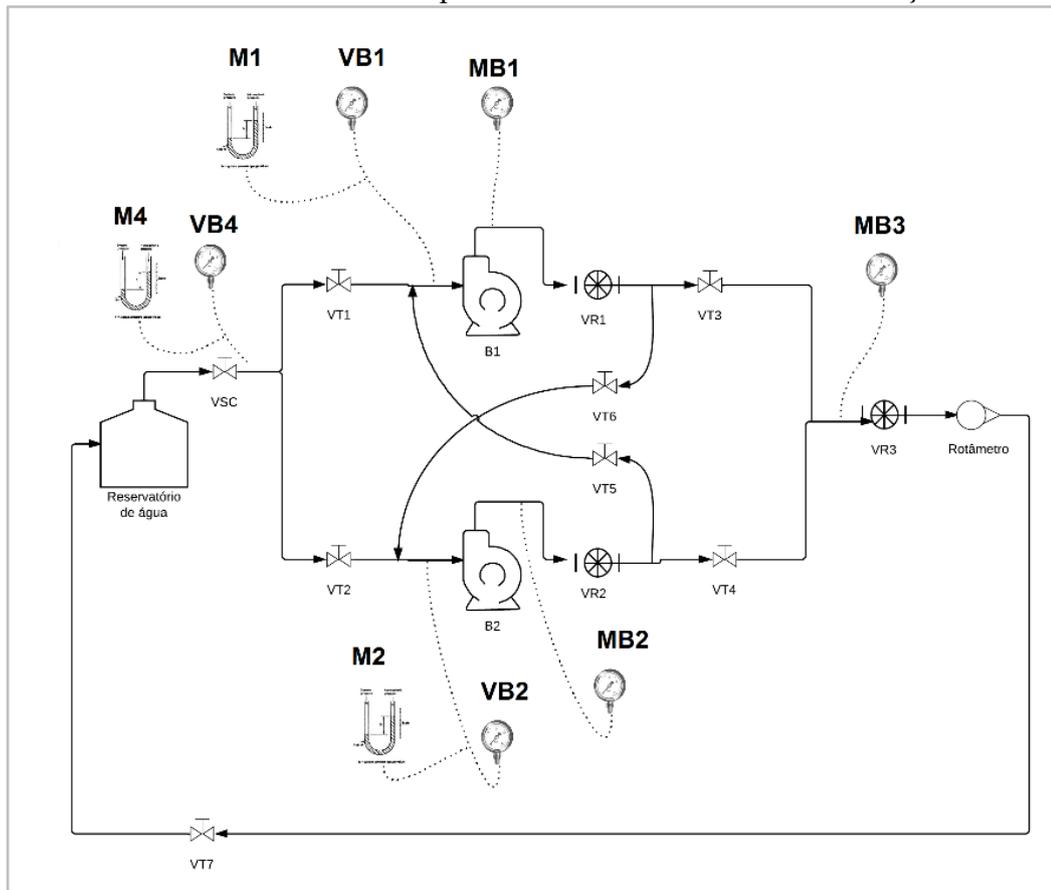
A estrutura física do experimento de bombeamento (Figura 10) é composta por vacuômetros de Bourdon, indicando pressão negativa a montante das estruturas de bombeamento, manômetros de Bourdon, registrando pressões positivas a jusante das bombas; manômetros em U para conferência; além de válvulas de esfera e de travamento, com objetivo de montar o circuito e regular a passagem de água (Figura 11).

Figura 10 – Estrutura física do protótipo de bombeamento e cavitação situado no LabHidra.



Fonte: fornecido pela EcoEducativa.

Figura 11 – Estrutura de válvulas do experimento de bombeamento e cavitação do LabHidra.



Fonte: arquivos próprios do LabHidra.

A lista completa de materiais encontra-se a seguir:

- Um reservatório de água (RA);
- Dois conjuntos motor-bombas centrífugas (BC1 e BC2), marca Hogel TBHWS-RN, ½ CV, 60 Hz, 3,50 A,  $\cos \varphi = 0,72$  e  $\eta_m = 0,66$ , 1/2 CV, marca Hogel;
- Medidor de vazão (Rotâmetro – MV);
- Três manômetros de tubo de vidro em U, contendo mercúrio metálico como fluido manométrico (M1, M2 e M3);
- Três vacuômetros do tipo Bourdon (VB1, VB2 e VB3);
- Três manômetros do tipo Bourdon (MB1, MB2 e MB3);
- Três válvulas de regulagem de vazão (VR1, VR2 e VR3);
- Seis válvulas de travamento (VT1 a VT6);
- Uma válvula simuladora de cavitação (VSC);
- Válvula de travamento (VT7) e válvula de alívio (VA) ao fim do circuito;
- Painel elétrico com dois Wattímetros.

### 3.1.2 Procedimento experimental

O experimento real de bombeamento tem como objetivo a construção da curva correspondentes ao processo de bombeamento: curva característica da bomba e das associações, curva da potência hidráulica para a bomba individual e do rendimento hidráulico para a bomba individual. Além disso, busca observar o fenômeno de cavitação através do aumento da perda de carga localizada.

Para a construção da curva característica da bomba, aumenta-se gradualmente a vazão em intervalos a serem definidos, registrando as pressões de entrada e de saída com os vacuômetros e manômetros, respectivamente. Para cada ponto de medição, avalia-se a potência elétrica disponível pela rede, através dos wattímetros no painel elétrico.

Com as medições das pressões de entrada, de saída e da potência disponível para cada vazão, é possível realizar os cálculos necessários para determinar a altura manométrica, a potência hidráulica e o rendimento hidráulico para cada vazão. Dessa forma, a construção das curvas se dá de forma experimental, sendo necessário um ajuste para produzir as curvas ideais, caso o mesmo ache necessário.

Para as associações, repete-se os passos citados anteriormente, mas avaliando apenas as pressões de entrada e saída das bombas. A construção da curva característica da associação deve ser comparada em um mesmo gráfico com a da bomba individual, de forma a observar os efeitos de cada configuração.

Para o procedimento de cavitação, fecha-se a Válvula Simuladora de Cavitação (VSC), de forma a aumentar a perda de carga até que a pressão do escoamento seja inferior à pressão de vapor. Assim, há a formação de bolhas, que podem ser visualizadas pelos estudantes através de um tubo transparente a montante das bombas.

### 3.1.3 Limitações do experimento real

O experimento real de bombeamento possui limitações típicas de laboratórios reais. Não é possível realizar a troca do material da tubulação, nem mexer na estrutura e disposição das peças e acessórios. Para a cavitação, essa rigidez não permite uma exploração mais aprofundada das causas, como mudança do nível do reservatório, da cota da bomba, alteração da temperatura e da altitude.

### 3.2 ESTRUTURA DO LABORATÓRIO VIRTUAL

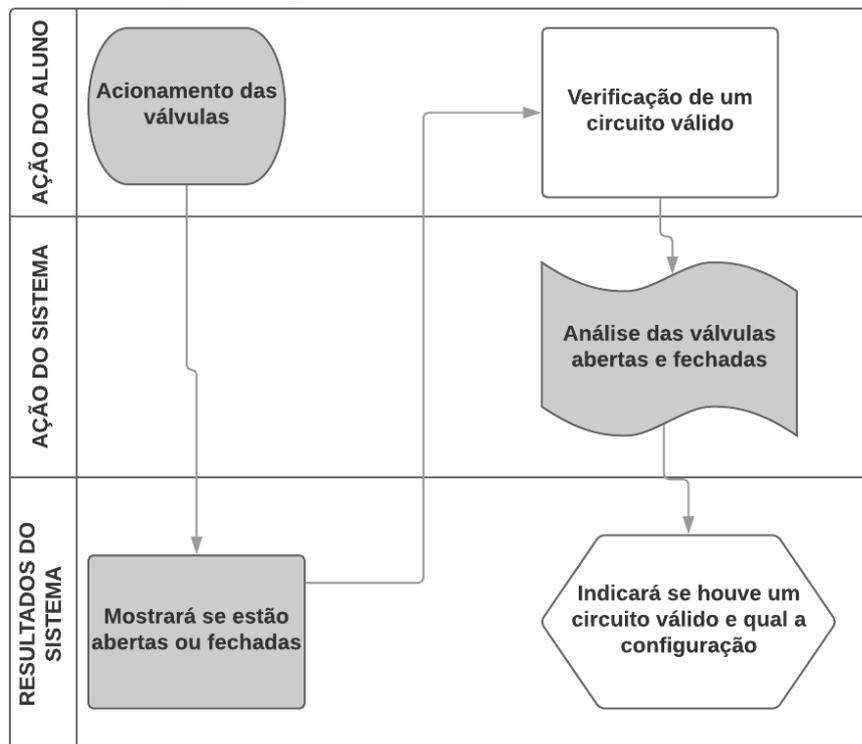
Baseado no experimento real, o laboratório virtual foi composto, essencialmente, por três módulos principais: configuração de circuitos (nomeado como “válvulas” para facilitar o entendimento dos usuários), bombeamento e cavitação. Além disso, possui sistemas adjacentes de forma a explicar o conteúdo, a estrutura do sistema físico e os desenvolvedores, como um programa clássico.

#### 3.2.1 Módulo de configuração do circuito (válvulas)

O módulo de configuração do circuito (válvulas) tem como objetivo o aluno detectar quais válvulas devem ser acionadas e quais devem ser fechadas, de forma a produzir uma configuração adequada (individual, série ou paralelo). O procedimento é o mais simples, com o usuário apenas clicando nas válvulas para abrir ou fechar e ativando um botão de verificação de validade do circuito

Para a elaboração do módulo de válvulas, foi construído um fluxograma explicativo, mostrando o passo a passo do seu funcionamento (Figura 12).

Figura 12 – Fluxograma explicativo do funcionamento do módulo de válvulas.



Fonte: autoria própria

A partir do módulo de configuração de circuito, o aluno pode compreender como acionar as válvulas corretas, de forma a mostrar a disposição desejada: bomba individual, associação em série ou a associação em paralelo. A partir disso, pode-se partir para os demais módulos, representando os experimentos de bombeamento e cavitação.

### **3.2.2 Módulo de Bombeamento**

O módulo de bombeamento tem como objetivo principal o aluno compreender as influências de estruturas de bombeamento nas pressões do escoamento. Além disso, busca dar suporte à construção das curvas referentes ao processo. Por fim, mostra as mudanças e os efeitos de cada associação na curva característica e nas cargas de energia do sistema.

Para o processo, o aluno inicia as medições com a bomba individual (tendo a opção de trocar a configuração a qualquer instante). Como primeiro passo, deve regular a vazão através de uma válvula associada a um rotâmetro, oscilando-a em um intervalo constante. Para cada vazão, novas pressões são indicadas nos manômetros e vacuômetros, e uma nova potência elétrica disponível é mostrada no wattímetro.

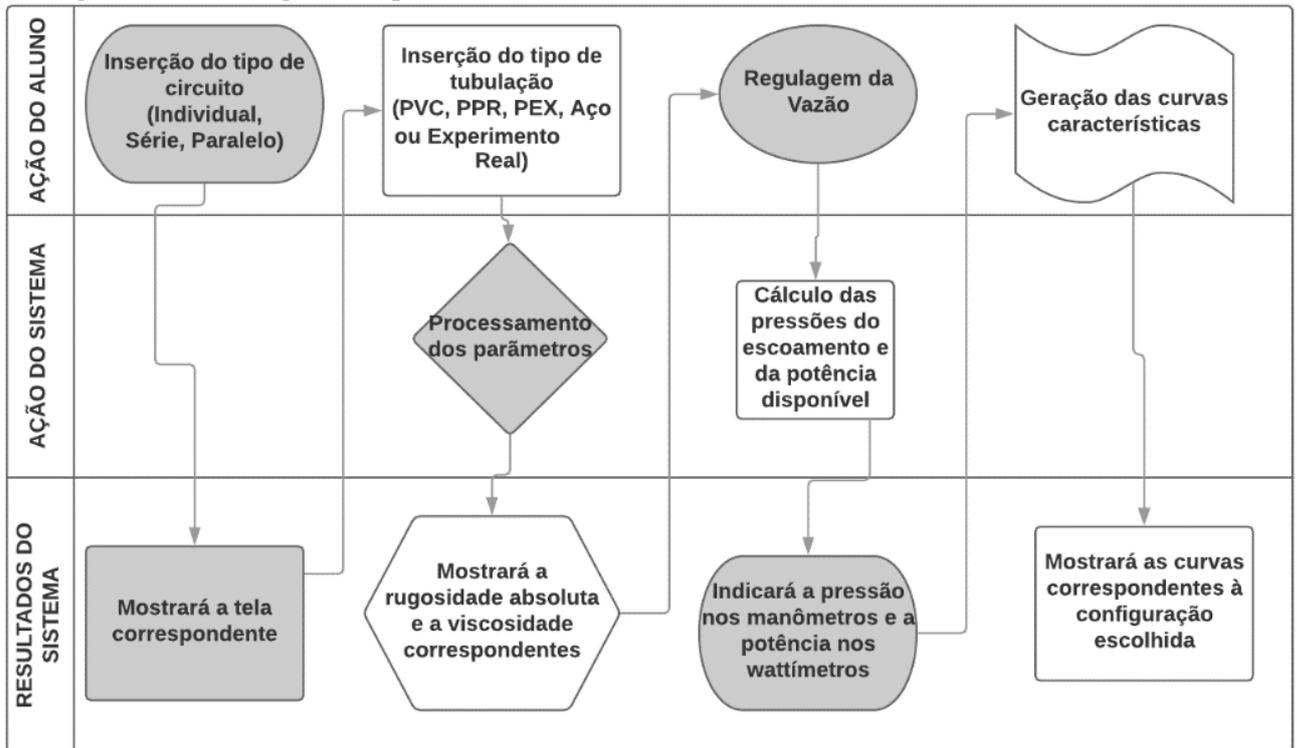
Após o registro das pressões e das potências disponíveis para todas as vazões, é possível traçar externamente a curva característica da bomba, a curva da potência hidráulica e a curva do rendimento hidráulico. As formulações necessárias estão disponíveis tanto no programa quanto nos materiais didáticos das disciplinas de Hidráulica 1 e Hidráulica.

Vale-se ressaltar que, a qualquer momento, é possível trocar o material da tubulação (algo inviável num experimento real), observando a influência da rugosidade nas pressões do escoamento. Dentro das opções, pode-se escolher o material e a viscosidade correspondentes ao experimento real, de forma a possibilitar o aluno de conferir suas medições e resultados. A alteração no material, contudo, não altera as curvas correspondentes, pois as mesmas são características da bomba e não do sistema.

Por fim, o aluno pode realizar os mesmos procedimentos com a associação em série e em paralelo. Para ambas, o programa gera apenas as curvas características, não trabalhando com as de potência hidráulica, nem com as de rendimento.

Para a elaboração do módulo de bombeamento, foi construído um fluxograma explicativo, mostrando o passo a passo do seu funcionamento (Figura 13).

Figura 13 – Fluxograma representativo do funcionamento do módulo de bombeamento.



Fonte: autoria própria

A partir desse módulo, o aluno pode gerar as próprias curvas em uma planilha e comparar os resultados com os fornecidos pelo programa, verificando a ocorrência ou não de erros. Vale-se ressaltar que a curva do programa é pré calibrada, portanto haverá algumas poucas diferenças para os cálculos realizados.

### 3.2.3 Módulo de cavitação

O módulo de cavitação tem como objetivo o estudante compreender os fatores que influenciam a cavitação e o momento em que ela ocorre (quando a pressão do escoamento no ponto mais crítico ficar igual ou inferior à pressão de vapor). Dessa forma, resolve uma das limitações do experimento real, na qual apenas se observa o fenômeno, mas as causas não são avaliadas.

O experimento é dividido em três seções, cada uma buscando mostrar diferentes influentes no processo de cavitação. Na primeira seção, o aluno pode observar a influência da temperatura, da vazão e do nível do reservatório. Na segunda, verifica a relevância da posição da bomba (afogada ou não afogada). Na última, analisa a redução da pressão devido ao aumento da perda de carga.

A primeira seção é a mais completa, com o usuário inicialmente definindo a temperatura da água no experimento (algo inviável no experimento real). Para cada valor escolhido, há uma pressão de vapor correspondente, segundo Porto (2006). Com isso, o estudante pode compreender que em regiões mais quentes, há uma maior possibilidade de cavitação, devido ao aumento da pressão de vapor.

Após definir a temperatura, o aluno deve aumentar a vazão ao máximo, observando uma queda na pressão do escoamento imediatamente antes da bomba (ponto de menor pressão). Quanto maior a descarga, maior a perda de carga, menor a pressão e mais provável a cavitação.

Com a descarga aumentada ao máximo, o estudante deve regular o nível do reservatório, observando a pressão no escoamento. Quando o nível for baixo o suficiente a ponto de a carga de pressão imediatamente antes da bomba se tornar inferior à pressão de vapor, o programa automaticamente aciona um alarme, indicando o fenômeno.

Em qualquer momento da primeira seção, o estudante pode alterar a temperatura, a vazão e o nível, observando se isso resolve ou intensifica a cavitação.

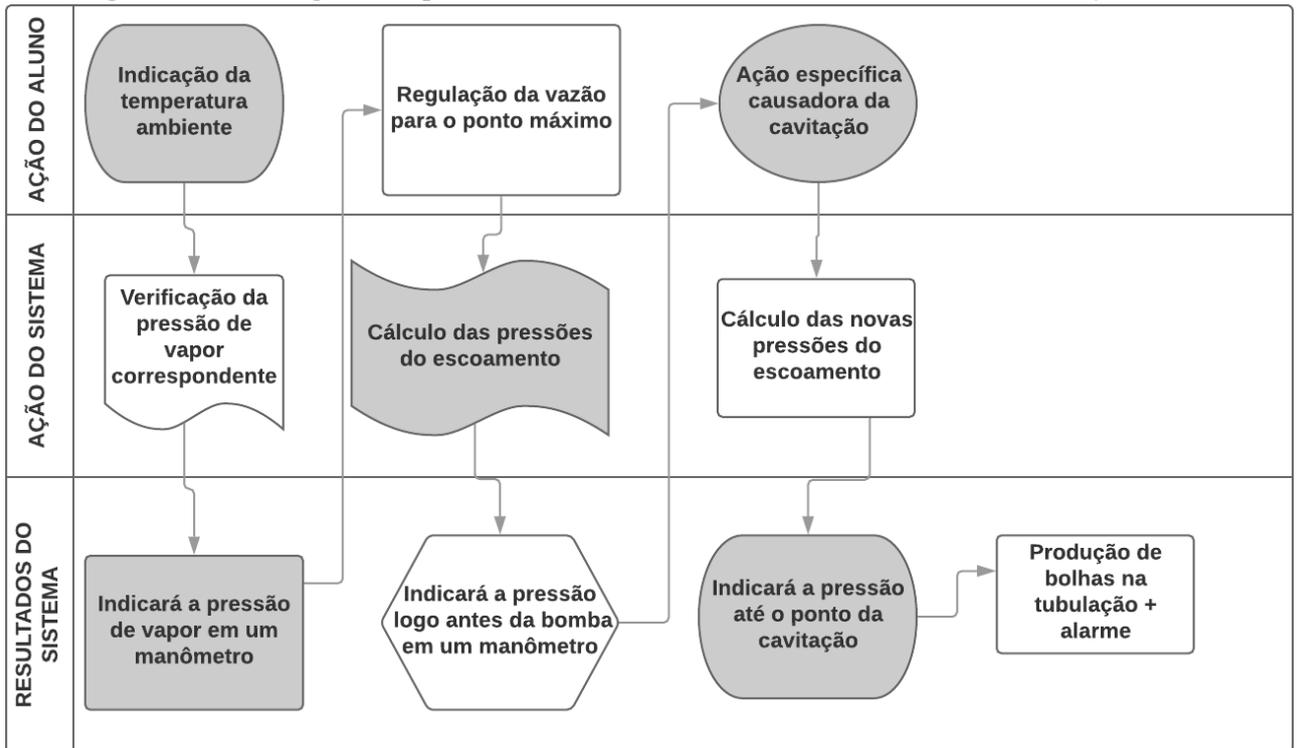
Na segunda seção, a temperatura e a vazão estão fixas, com o aluno apenas alterando a posição da bomba em relação ao nível do reservatório. Quanto mais elevada for a cota do equipamento, menor a carga de pressão no ponto crítico e mais propícia é a ocorrência de cavitação. Essa etapa tem como objetivo o aluno verificar os riscos do uso de bombas não afogadas. Da mesma forma que na primeira seção, um alarme será acionado na ocorrência do fenômeno.

A última seção reproduz o experimento real. Com a temperatura fixa e a vazão ao máximo, consiste em fechar lentamente a válvula simuladora de cavitação, de forma a produzir uma perda localizada. A perda produzirá uma queda de pressão, acionando um alarme quando a mesma for menor que a pressão de vapor. Essa etapa tem como objetivo o aluno observar os riscos de circuitos longos e com grandes perdas.

Em um primeiro momento, haveria uma quarta seção, indicando a altitude do local do experimento. Entretanto, a mesma foi retirada devido à dificuldade de cálculos com banco de dados na linguagem computacional escolhida.

Para a elaboração do módulo de cavitação, foi construído um fluxograma explicativo, mostrando o passo a passo do seu funcionamento (Figura 14).

Figura 14 – Fluxograma representativo do funcionamento do módulo de cavitação.



Fonte: autoria própria

A partir desse experimento, o aluno pode entender exatamente o momento em que ocorre a cavitação e suas causas, facilitando a compreensão do ensaio no laboratório real.

Com os três principais módulos definidos, é possível começar o desenvolvimento do laboratório virtual, realizando os cálculos e processos de otimização necessários.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO LABORATÓRIO VIRTUAL

Para o desenvolvimento do laboratório virtual, deve-se realizar os cálculos necessários para a criação de um modelo matemático a ser otimizado. Para isso, vale-se ater aos procedimentos hidráulicos primeiramente, para em seguida, realizar a calibração dos parâmetros.

#### 3.3.1 Procedimentos e cálculos hidráulicos

Os cálculos hidráulicos foram realizados para a construção do laboratório virtual e deverão ser utilizados pelos alunos que usarem o programa, quando os mesmos forem reconstruir as curvas.

Segundo Porto (2006), em um volume controle, pode-se gerar uma equação de linha de corrente (1).

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (1)$$

Aplicando (1) em duas seções transversais do escoamento, pode-se calcular as pressões em que há medição através de manômetros ou vacuômetros, tendo em vista que a carga inicial (reservatório de abastecimento) é conhecida (cota de 50 cm). Com a realização dos processos de calibração, deve-se buscar uma aproximação dos cálculos e das medições.

Para o cálculo da altura manométrica da bomba para uma vazão específica, deve-se considerar um volume de controle com a seção de entrada a montante da bomba e a de saída a jusante. Como não há mudança de diâmetro nas duas seções, nem tampouco ramificações entre elas, não há oscilação da carga cinética, podendo-se cancelar esse termo.

Após o remanejamento da equação descrita em (1), pode-se isolar a altura manométrica, obtendo a equação da carga hidráulica (2).

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 + \Delta H_{12} \quad (2)$$

Ou seja, a altura manométrica fornecida por uma bomba para uma determinada vazão é igual ao aumento da cota piezométrica entre a entrada e a saída do volume de controle, descontando-se as perdas de carga existentes entre essas duas seções. Para os alunos, a equação é simplificada, considerando apenas a diferença de pressão, de forma a facilitar os cálculos.

Para o cálculo da perda de carga, utiliza-se a fórmula universal da perda de carga (3). Para o fator de atrito, aplica-se a equação de Swamee (4) e a relação de Reynolds (5); como consta em Porto (2006).

$$\Delta H = \frac{f * L * v^2}{2 * D * g} \quad (3)$$

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 * \left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3,7 * D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4)$$

$$Re = \frac{v * D}{\nu} \quad (5)$$

A potência hidráulica, para cada vazão, pode ser obtida a partir de uma relação entre a descarga e a altura manométrica (6). Já para o rendimento hidráulico, avalia-se a potência hidráulica calculada e a potência disponível pela rede (7), como medido no wattímetro do painel elétrico.

$$P_h = \gamma * Q * H \quad (6)$$

$$\eta_h = \frac{PH}{PD * \cos \varphi * \eta_m} \quad (7)$$

Tanto a potência hidráulica, quanto o rendimento, devem ser calculados pelos alunos de forma a propiciar a construção das respectivas curvas.

Com relação às associações em série, para a elaboração do programa, deve-se encontrar os valores equivalentes de altura manométrica e vazão, conforme a configuração (Quadro 4).

Quadro 4 – Cálculos do valor equivalente (eq) a partir de bombas individuais (a, b).

<b>Associação</b>	<b>Vazão equivalente</b>	<b>Altura manométrica equivalente</b>
Série	$Q_{eq} = Q_a = Q_b$	$H_{eq} = H_a + H_b$
Paralelo	$Q_{eq} = Q_a + Q_b$	$H_{eq} = (H_a + H_b)/2$

Fonte: autoria própria.

Vale-se ater que, seja no experimento real ou virtual, a vazão assinalada no rotâmetro é a da associação. Assim, o cálculo da vazão equivalente não é necessário aos alunos, na construção da respectiva curva característica. Todavia, os cálculos foram usados para a construção do modelo matemático do programa.

Com os valores calculados, pode-se obter as curvas necessárias. A construção das curvas para o programa se dá pelo método de regressão, como será visto na próxima subseção.

### 3.3.2 Equações das curvas das bombas

Os dados coletados em laboratório correspondem a pontos discretos, tanto para a altura manométrica, quanto para a potência e o rendimento. Para a geração de curvas contínuas, é necessário um ajuste dos dados. Entretanto, deve-se conhecer as equações geradoras a serem otimizadas.

Segundo Porto (2006), a perda de carga em um conduto pode ser descrita como função não linear da vazão (8).

$$\Delta H = x * Q^z \quad (8)$$

Para a determinação da equação da curva característica de uma bomba, considera-se que um equipamento de recalque possui uma altura máxima (quando a vazão é nula) e uma perda interna dependente da descarga (8). Relacionando-se os dois termos, pode-se obter uma equação genérica, a ser otimizada (9).

$$H = H_{m\acute{a}x} - x * Q^z \quad (9)$$

Considerando o que se consta na equação descrita em (9), pode-se obter os parâmetros  $x$  e  $y$  a partir de métodos de otimização, calculando-se a perda interna para cada ponto observado.

Após o ajuste e calibração da CCB, pode-se determinar a curva de potência hidráulica sem ajuste próprio, apenas aplicando (6) a cada vazão e altura manométrica calculada. Para o rendimento hidráulico, no entanto, é necessária uma otimização da potência elétrica disponível pela rede.

Segundo as leis de Ohm, a potência elétrica disponível em uma rede é determinada a partir de uma equação linear (10).

$$P_d = U * i \quad (10)$$

Conforme há o aumento da vazão, há uma maior atividade elétrica do conjunto moto-bomba e, portanto, uma maior potência fornecida pela rede. Essa atividade se dá de forma linear, isto é, através uma função de primeiro grau (11).

$$P_d = C + D * Q \quad (11)$$

Obtendo-se a curva otimizada de potência elétrica disponível, aplica-se a equação descrita em (7) para construir o gráfico do rendimento hidráulico das bombas.

### 3.3.3 Otimização das curvas do processo de bombeamento

Para a geração das curvas correspondentes ao processo de bombeamento, são necessários procedimentos de otimização. Por se tratarem de equações simples, o ajuste pode ser realizado pelo método de regressão, buscando minimizar os resíduos quadráticos inerentes ao processo.

Os resíduos, também chamados de desvios locais, correspondem aos erros gerados pelos modelos, isto é, à distância entre os dados observados e o modelo gerado (12). Como nenhum procedimento apresenta uma correlação perfeita, há sempre um resíduo a ser minimizado.

$$e = \hat{D} - F \quad (12)$$

O método da regressão consiste em minimizar o somatório dos desvios quadráticos, ou seja, tornar a distância da função para o real o mínimo possível. O erro é elevado ao quadrado para evitar cancelamentos e para maximizar grandes resíduos e minimizar os pequenos.

O cálculo dos parâmetros a partir da regressão é resumido através de uma equação matricial (13), cuja matriz dos parâmetros pode ser isolada (14).

$$X * \theta = \hat{D} \quad (13)$$

$$\theta = (X^T * X)^{-1} * X^T * \hat{D} \quad (14)$$

Com a equação descrita em (14), pode-se obter os parâmetros necessários a serem otimizados, derivando-se as equações básicas em função dos mesmos. Para a realização de uma equação linear, sobretudo, aplica-se um logaritmo em (9), gerando uma nova expressão (15).

$$\ln(H_{m\acute{a}x} - H) = \ln x + z * \ln Q \quad (15)$$

Assim, deriva-se as equações (11) e (15) em função dos respectivos parâmetros. As formas específicas da equação (13) das derivadas da perda interna e da potência disponível encontra-se em (16) e (17).

$$\begin{pmatrix} 1 & \ln(\hat{Q}_1) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \ln(\hat{Q}_{n_k}) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ln(x) \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ln(H_{m\acute{a}x} - \hat{H}_1) \\ \vdots \\ \ln(H_{m\acute{a}x} - \hat{H}_{n_k}) \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \hat{Q}_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \hat{Q}_{n_k} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{P}_{D1} \\ \vdots \\ \hat{P}_{Dn_k} \end{pmatrix} \quad (17)$$

A partir de uma série de dados observados, aplica-se a equação (14) em (16) e (17), podendo-se obter os parâmetros a serem linearizados e permitindo a geração das curvas associadas.

A avaliação da eficácia dos parâmetros se dá através de duas funções objetivo: NSE (18), que verifica o quanto o modelo se adere aos dados; e RMSE (19), que verifica como os desvios se comportam em média.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_k} (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2} \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n_k}} \quad (19)$$

Como forma de analisar o NSE, deve-se buscar um valor o mais próximo de 1 possível, que corresponderia à aderência perfeita. Quanto mais elevado o NSE, mais o modelo se destaca em relação ao sistema mais simples (a média). Para o RMSE, busca-se valores próximos de 0, de forma a minimizar os desvios. Vale-se ressaltar que o valor de RMSE segue a ordem de grandeza das medidas, não podendo comparar essa função com duas grandezas distintas.

Um ponto a ser considerado refere-se ao número de elementos de uma amostra. O valor de  $n$  influencia nos resultados de NSE e no RMSE, não sendo recomendado comparar valores associados a eventos com quantidades de medições diferentes. (JAIN; SUDHEER, 2008).

### 3.3.4 Calibração dos parâmetros do experimento real

A calibração dos parâmetros do experimento real tem como objetivo realizar uma simulação virtual mais próxima possível da realidade. O processo foi feito a partir de dados coletados pelas duas tomadas de pressão a montante da bomba (VB3 e VB1), medindo a carga de pressão em cada um dos vacuômetros.

Ao se calcular a diferença de pressão entre os dois pontos, pode-se obter a perda de carga observada entre eles, usando a equação da linha de corrente descrita em (1). Conhecendo-se as características geométricas da tubulação (diâmetro e comprimento), bem como os acessórios causadores de perdas localizadas, pode-se calcular o fator de atrito observado, através da equação relatada em (3).

A partir das equações descritas em (4) e (5), nota-se que há dois parâmetros dependentes das características da tubulação e do fluido em questão: a rugosidade absoluta e a viscosidade cinemática, respectivamente. Apesar de serem valores tabelados para o tipo de conduto e líquido, o uso contínuo do experimento real gera desgaste e misturas, não representando com exatidão a realidade. A calibração dos mesmos é de importância para uma simulação mais próxima da realidade.

A regressão dos parâmetros, como vista na calibração das bombas, acaba por exigir processos de derivação, o que não é viável para as equações relatadas em (4) e (5), devido à alta complexidade. Além disso, como já citado, métodos de regressão tendem a convergirem para mínimos locais. Em funções mais complexas, como é a situação das supracitadas, exigem-se métodos com uma otimização global.

O método utilizado para a calibração foi o GLUE. Escolhido devido à pouca quantidade de parâmetros e intervalo possível de parâmetros bem definido. Dessa forma, o alto custo computacional não seria problema, podendo gerar valores com agilidade.

Para a função GLUE, determina-se um intervalo de aceitação dos valores de cada parâmetro e gera-se uma função de valores aleatórios (20).

$$w_{ale} = w_{min} + R * (w_{max} - w_{min}) \quad (20)$$

Utilizando a equação descrita em (20), nota-se que cada valor se encontra no intervalo estabelecido entre o máximo e o mínimo. Quanto maior o número de iterações, maior a probabilidade se localizar valores ideais.

Definindo-se os valores aleatórios para os parâmetros, utiliza-se (4) e (5) para obter um valor de fator de atrito modelado, calculando-se a perda de carga em seguida. Usando a função objetivo NSE, descrita em (18), pode-se escolher o conjunto dos parâmetros que obtiveram o melhor resultado.

A geração de muitas iterações incorre em um elevado custo computacional. Entretanto, como o número de parâmetros a ser modelado é pequeno (apenas dois) e há somente duas equações no processo, esse custo acaba sendo reduzido.

Para o processo, foram simuladas 100.000 iterações com uma semente fixa. Para testar a eficácia da calibração, observou-se o NSE entre a perda de carga medida entre VB3 e VB1 (saída do reservatório e entrada da bomba) e a calculada com as novas pressões.

De forma a verificar a capacidade de expansão do modelo, o processo foi validado verificando o NSE entre o RA e o VB1 (topo do reservatório e entrada da bomba 1) e entre o MB1 e o MB2 (saída das duas bombas em uma associação em série).

### 3.3.5 Definição das pressões no escoamento

A partir da determinação dos parâmetros, é possível simular as pressões nos manômetros e vacuômetros do experimento. Definindo-se um volume de controle, utilizam-se as equações (1), (3), (4) e (5) para obter a pressão estimada em qualquer ponto. Um ponto de partida é o topo do reservatório de abastecimento (RA), com a cota energética conhecida e igual ao seu nível geométrico.

### 3.3.6 Simulação da cavitação

A cavitação, como já explicado, é um processo que ocorre quando a pressão do escoamento se iguala à pressão do vapor, provocando a ebulição e a formação de bolhas na tubulação.

Para a simulação de cavitação, é necessário o conhecimento da pressão de vapor máxima da água em função da temperatura e da mínima pressão no circuito (Tabela 1). Para o

cálculo da pressão absoluta, considera-se a pressão atmosférica igual a 10,33 mca. Em seguida, aplicam-se as equações (1), (3), (4) e (5) para obter a pressão estimada absoluta em qualquer ponto.

### 3.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PROGRAMA

Após a elaboração do laboratório virtual, é necessária uma verificação da sua possível aplicabilidade para os estudantes. O programa, em si, busca uma abordagem didática, então é fundamental que haja uma melhora no desempenho e/ou na aceitação dos alunos.

Para a realização da avaliação, comparou-se os resultados ou opiniões de alunos que utilizaram o laboratório virtual em complemento ao real, chamado de grupo de aplicação (A); com aqueles que só frequentaram o experimento real, sem usar o programa, denominado grupo de controle (B).

A experiência foi realizada no semestre 2019.2, para as turmas de Hidráulica 1 (ENS7008) e Hidráulica (ENS5101) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Para garantir a presença de ao menos uma amostragem no grupo A, os alunos de Hidráulica 1 (ENS7008) do semestre 2019.2 foram convidados a uma aula expositiva ao laboratório virtual, no horário da disciplina. Também era permitida a entrada de alunos de Hidráulica (ENS5101), caso os mesmos se interessassem. Além disso, o programa ficou disponível na plataforma *Moodle* para todos os estudantes das duas disciplinas em 2019.2.

Dessa forma, para uma análise estatística mais confiável, o grupo de aplicação foi dividido em três subgrupos: os que usaram em sala e em casa (A1), os que usaram somente em sala (A2) e os que usaram somente em casa (A3). Essa divisão tem como objetivo verificar se a explicação na aula expositiva causou alguma influência no desempenho dos alunos.

Como primeira forma de avaliação, foi feita uma comparação quantitativa de desempenho dos estudantes nos dois grupos e nos subgrupos. Essa análise se baseou nas notas da atividade avaliativa realizada após o experimento. Para a comprovação estatística, é necessário que as médias dos alunos do grupo de aplicação sejam superiores às de controle, considerando o nível de significância estabelecido.

A segunda forma de avaliação se deu através de uma análise opinativa dos próprios estudantes, através de um questionário aplicado aos alunos de todos os grupos. As perguntas se concentraram em uma tabela avaliando o quanto cada experimento (real ou virtual) ajudou no entendimento da matéria.

Para a confirmação da influência ou não, foram utilizadas análises estatísticas baseadas no teste de hipótese de médias, como será visto na próxima subseção.

### 3.4.1 Princípios e hipóteses do teste estatístico de médias

O teste de hipótese de médias busca comparar as médias amostrais de dois grupos distintos, verificando se elas se diferem (teste bilateral), ou se uma é superior (teste unilateral à direita) ou inferior (teste unilateral à esquerda) à outra.

Em qualquer teste estatístico, há duas hipóteses a serem analisadas:

- **H0**: hipótese cuja veracidade busca-se rejeitar com a aplicação do devido teste estatístico;
- **H1**: hipótese a ser considerada em um teste estatístico, caso a hipótese H0 tenha sido rejeitada.

Como já citado, os testes de hipótese de médias buscam, a princípio, rejeitar H0 e, por consequência, supor H1, que varia de acordo com o tipo de teste (Quadro 5).

Quadro 5 – Hipóteses a serem verificadas pelos testes estatísticos de média.

Limite	Teste bilateral	Teste unilateral à direita	Teste unilateral à esquerda
Hipótese H0	$\mu_1 = \mu_2$		
Hipótese H1	$\mu_1 \neq \mu_2$	$\mu_1 > \mu_2$	$\mu_1 < \mu_2$

Fonte: autoria própria.

Após a formulação das hipóteses, deve-se fixar um nível de significância, que corresponde ao erro máximo aceitável ao rejeitar a hipótese H0, ou seja, aceitar H1. Esse nível é responsável por guiar os cálculos e indicar a confiança da análise estatística. Dessa forma, caso o teste de hipótese resulte em H1, confirma-se essa hipótese com o nível de confiança estimado. Caso contrário, não se pode rejeitar H0, o que não indica que o mesmo seja verdadeiro, apenas não foi negado com a confiança estabelecida.

Após a adoção do nível de significância, deve-se observar o grau de liberdade de cada uma das amostras (21).

$$GL_k = n_k - 1 \quad (21)$$

O grau de liberdade, bem como nível de significância, é fundamental para o traçado dos intervalos de confiança, como está descrito na próxima subseção.

### 3.4.2 Definição de intervalos de confiança e teste de hipótese

Para o cálculo e a determinação dos intervalos de confiança, usa-se a curva de probabilidade *t-student*, pois a variância populacional é desconhecida. O traçado depende também do grau de liberdade de cada um dos grupos envolvidos no teste do nível de significância adotado.

Os valores da curva de probabilidade *t-student* são obtidos através de distribuições de probabilidade disponíveis no software *Statistica* e em diversos outros programas como *Matlab* e *Microsoft Excel*. Independente da ferramenta utilizada para o cálculo, deve-se promover a inserção correta dos dados de entrada exigidos (Quadro 6).

Quadro 6 – Dados de entrada do intervalo de confiança definido pela distribuição *t-student*.

Limite	Teste bilateral	Teste unilateral à direita	Teste unilateral à esquerda
Inferior	$\alpha/2, GL_1, GL_2$	–	$\alpha, GL_1, GL_2$
Superior	$1 - \alpha/2, GL_1, GL_2$	$1 - \alpha, GL_1, GL_2$	–

Fonte: autoria própria.

Com o intervalo de confiança definido, deve-se calcular a medida estatística *t-student* correspondente aos dados observados (22), observando a variância relativa entre eles (23). Caso o valor resultante esteja no interior do intervalo de confiança, não se pode rejeitar a hipótese  $H_0$ , nem assumir seu respectivo pressuposto. Caso contrário, rejeita-se  $H_0$  e assume-se  $H_1$ , com uma chance de erro igual ao nível de significância estabelecido.

$$t_{obs} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{s_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (22)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) * s_1^2 + (n_2 - 1) * s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (23)$$

### 3.4.3 Análise de desempenho dos estudantes

A análise do desempenho dos estudantes se resume à realização de testes de hipóteses para verificar se houve ou não ganho de nota com a aplicação do laboratório virtual em complemento ao real.

Dessa forma, o teste aplicado é o unilateral à direita do grupo de aplicação (A) em relação ao de controle (B). As hipóteses são:

- **H0:** A média das notas do grupo de aplicação no experimento 2 não é superior à do grupo de controle, ou seja,  $\mu_A = \mu_B$ ;
- **H1:** A média das notas do grupo de aplicação no experimento 2 é superior à do de controle, ou seja,  $\mu_A > \mu_B$ .

Em caso de confirmação da hipótese H1, aceita-se, a princípio, que o uso laboratório virtual contribui para um melhor aprendizado, levando em conta a probabilidade de erro escolhida. Caso contrário, como já citado, não se rejeita H0, mas também não se assume que seu pressuposto é verdadeiro.

A existência de fatores externos, contudo, pode interferir nos resultados estatísticos.

A presença da apresentação do programa em sala de aula pode ter sido significativa. Para verificar se esse fator é relevante, analisou-se se a média das notas dos alunos que usaram o equipamento em sala (A1 ou A2) foi superior à dos que usaram somente em casa (A3), usando testes unilaterais à direita ( $\mu_{A1} > \mu_{A3}$  ou  $\mu_{A2} > \mu_{A3}$ ).

Caso haja confirmação da hipótese H1, quanto à melhora do desempenho devido à explicação em sala, faz-se necessário usar um teste unilateral à direita apenas entre o subgrupo dos alunos que usaram apenas em casa (A3) com os que não usaram (B). Em caso de confirmação de H1, há maior indício que o uso do laboratório virtual contribui para a melhora do desempenho.

### 3.4.4 Análise opinativa dos estudantes

A análise opinativa dos alunos corresponde à criação de um questionário respondido pelos estudantes inscritos nas disciplinas de Hidráulica e Hidráulica 1. As perguntas foram aplicadas tanto aos alunos submetidos ao laboratório virtual (A), quanto àqueles que só usaram o real (B), de forma voluntária e supervisionada pelo Comitê de Ética (Certificado de Apresentação para Apreciação Ética: CAAE = 13212619.1.0000.0121).

As perguntas foram feitas analisando a aceitação dos alunos referentes a cada tema envolvido no experimento de bombeamento. As respostas possuem caráter de intensidade. Como os questionamentos são idênticos para os dois tipos de laboratório, buscou-se constatar se houve maior aceitação (respostas mais favoráveis) ao experimento virtual do que ao real.

A verificação da aceitação se deu por meio de teste bilateral à direita, pontuando cada resposta, baseada no quanto cada um dos laboratórios contribuiu para o aprendizado de determinado conteúdo (Quadro 7).

Quadro 7 – Definição da pontuação para cada uma das respostas do questionário de opinião.

<b>Resposta</b>	<b>Pontuação</b>
<b>Ajudou Muito</b>	+2
<b>Ajudou Pouco</b>	+1
<b>Não Ajudou</b>	0
<b>Deixou mais confuso</b>	-1

Fonte: autoria própria.

Transformando as respostas dos alunos em pontos, como mostra o Quadro 7, pode-se somar a pontuação de todas as respostas, obtendo um de aceitação para cada aluno. O teste de hipóteses foi realizado comparando se a média de pontos das respostas do experimento virtual foi superior à do real.

Dessa forma, as hipóteses a serem consideradas são:

- **H0:** A média de pontos das respostas do experimento virtual não foi superior à do real, ou seja,  $\mu_{\text{virtual}} = \mu_{\text{real}}$ ;
- **H1:** A média de pontos das respostas do experimento virtual foi superior à do real, ou seja,  $\mu_{\text{virtual}} > \mu_{\text{real}}$ .

Confirmando-se H1, pode-se inferir que o uso do experimento virtual contribuiu para uma melhora no entendimento dos alunos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, será avaliada a elaboração do laboratório virtual, bem como sua viabilidade após a aplicação aos alunos.

Em um primeiro momento, serão citadas as medições realizadas no experimento real, bem como as características geométricas e físicas dos acessórios. O balanço da estrutura do protótipo físico é fundamental para os cálculos de pressão e para o modelo matemático.

Após a observação das medições e da configuração do circuito, será discutida a construção do modelo matemático, mediante a calibração dos parâmetros reais, observando os erros associados e a eficiência do modelo. Em complemento, serão mostrados os ajustes das curvas das bombas e associações, citadas anteriormente.

Com a base do laboratório virtual devidamente detalhada, será exposta a estrutura do programa em si, mostrando as telas e as semelhanças e diferenças com o experimento real.

Como conclusão da seção, será avaliada a análise de viabilidade, mediante os testes estatísticos aplicados nos estudantes de Hidráulica e Hidráulica 1.

### 4.1 MEDIÇÕES E CÁLCULOS PRELIMINARES

#### 4.1.1 Medições de pressão e potência do experimento real

Analisar a estrutura do equipamento real é fundamental para a sua recriação em ambiente virtual. Com objetivo de calibração e simulação, o circuito foi dividido em trechos, obedecendo às tomadas de pressão existentes. Para tal, foi realizada a divisão da tubulação por trechos, considerando suas devidas características geométricas (Tabela 4).

Tabela 4 – Características geométricas e energéticas por trecho do experimento real.

Trecho	$L_{\text{virtual}}$ (m)	$Z_{\text{montante}}$ (m)	$Z_{\text{jusante}}$ (m)	D (m)
RA – VB3	5,80	0,50	0,00	0,032
VB3 – VB1	8,22	0,00	0,00	0,032
VB3 – VB2	8,22	0,00	0,00	0,032
VB1 – MB1	0,45	0,00	0,30	0,032
VB2 – MB2	0,45	0,00	0,30	0,032
MB1 – MB2	15,80	0,30	0,30	0,032

Fonte: autoria própria.

O experimento foi realizado com uma vazão inicial de 20 L/min, aumentando-a gradativamente de 5 em 5 L/min. Foram coletados dados para a bomba individual 1, bomba individual 2, associação em série (de BC1 para BC2) e associação em paralelo.

Os resultados das medições encontram-se nos apêndices (A, B, C, D e E). Vale-se ressaltar que os vacuômetros só medem pressão negativa. Quando os mesmos estão zerados, a pressão no ponto é positiva, não sendo possível sua determinação pelo medidor.

Com as características geométricas definidas e as medições realizadas, pôde-se realizar a calibração dos parâmetros, como será visto na próxima subseção.

#### 4.1.2 Calibração dos parâmetros do experimento real

Considerando as medições realizadas para a bomba individual, os parâmetros foram calibrados para o trecho da saída do reservatório a entrada da bomba 1, através dos vacuômetros VB3 e VB1, respectivamente.

É possível observar, pelos dados apresentados no Apêndice A, que o VB3 só apresentou medidas válidas a partir de 65 L/min. Isto se deu, conforme já explicado, pois o vacuômetro só mede pressão negativa. Não foi possível coletar dados através do M3, pois o mesmo encontrava-se em manutenção.

Aplicando o método GLUE de otimização global, com 100.000 iterações e 3 min e 51 s de processamento, obteve-se um NSE de 0,9724 e um RMSE de 0,0947. Esses valores já indicam uma possível eficácia do modelo, já que o NSE ficou próximo de 1 e o RMSE de 0. Para tal, foram estabelecidos limites para cada um dos parâmetros com uma ordem de grandeza acima e uma abaixo dos valores tabelados (Tabela 5).

Tabela 5 – Limites e resultados da calibração dos parâmetros através do método GLUE.

	<b>Rugosidade absoluta (m)</b>	<b>Viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Limite inferior</b>	1,00*10 <sup>-7</sup>	5,00*10 <sup>-7</sup>
<b>Limite superior</b>	1,00*10 <sup>-5</sup>	5,00*10 <sup>-6</sup>
<b>Valor ótimo</b>	<b>9,17*10<sup>-6</sup></b>	<b>5,14*10<sup>-6</sup></b>

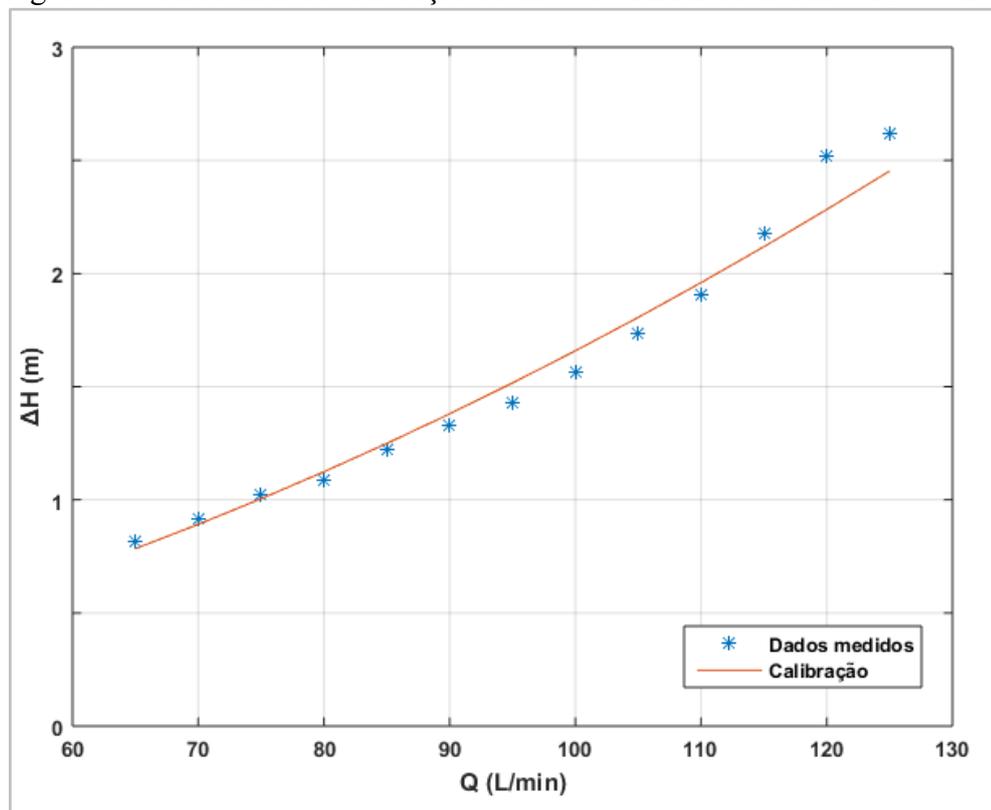
Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Tabela 5, a rugosidade da tubulação está mais de 9 vezes maior em relação à descrita em Porto (2006), com 0,00917 mm calibrados contra 0,00100 mm da literatura. Isso se dá provavelmente devido ao desgaste da tubulação após anos de uso.

A viscosidade cinemática da água também apresentou uma alteração significativa, com valor cinco vezes maior em relação ao apresentado em Porto (2006), de  $1,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20^\circ\text{C}$ . Isso se deve provavelmente às impurezas da água e sólidos na tubulação, devido à ausência total de manutenção.

Além das funções objetivo, pode-se avaliar a eficácia da calibração, através de um gráfico de aderência, observando os desvios locais associados (Figura 15).

Figura 15 – Aderência da calibração do modelo GLUE no trecho VB3 – VB1.



Fonte: autoria própria.

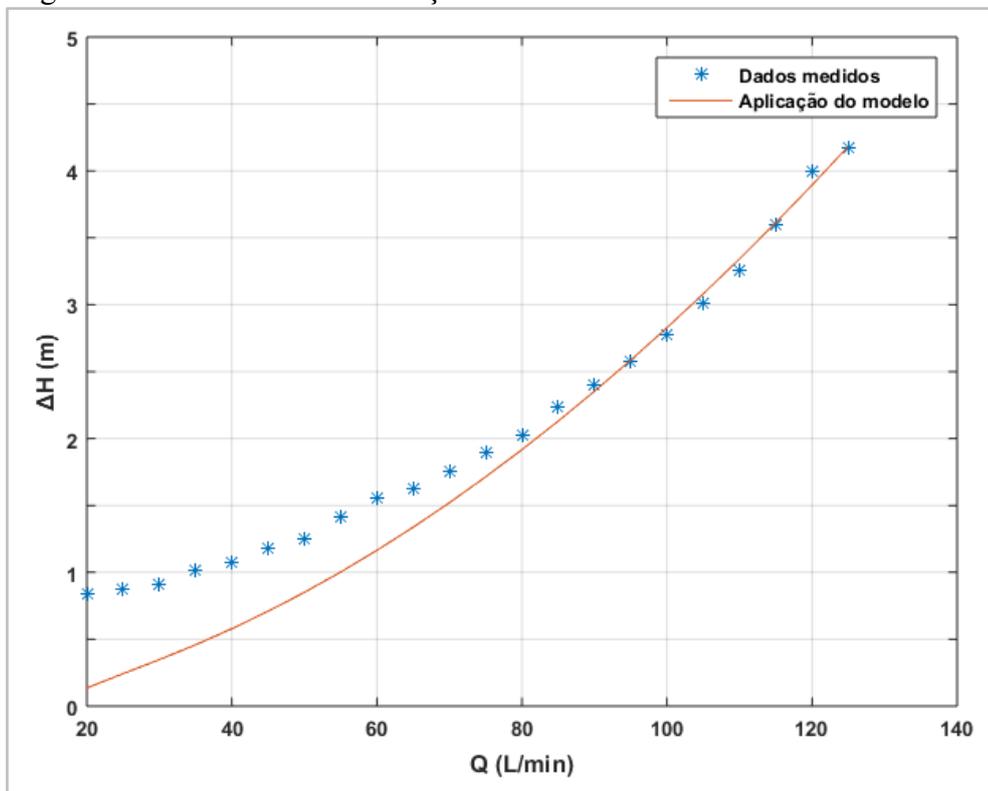
A partir da Figura 15, pode-se observar que o modelo obteve uma ótima aderência, em consonância com o NSE elevado e com o RMSE baixo. Apenas em valores mais altos houve um aumento nos erros, possivelmente devido ao aumento da turbulência e instabilidade. Com medições maiores, os ponteiros dos manômetros e vacuômetros oscilam constantemente, diminuindo a precisão.

Para confirmar a capacidade de generalização do modelo, foram aplicados os valores otimizados para o trecho situado entre o topo do reservatório até a entrada da bomba 1 (medidores RA e VB1). Nesse caso, está havendo apenas uma ampliação do volume de controle verificado na calibração.

Como alternativa à validação anterior, foi utilizado o trecho da saída da bomba 1 até a saída da bomba 2, considerando uma associação em série. As pressões foram obtidas pelos manômetros MB1 e MB2, com o resultado diretamente em mca. Esse trecho é relevante pois não tem qualquer coincidência com os anteriores. Portanto, avalia ainda mais a capacidade de generalização do modelo GLUE.

Ao aplicar o modelo no trecho RA – VB1 (Figura 16), característico da bomba individual, o NSE foi calculado em 0,8808 e o RMSE 0,3495. Vale-se repetir que, devido ao aumento do número de dados, é comum as funções objetivo apresentarem resultados menos satisfatórios.

Figura 16 – Aderência da validação do modelo GLUE no trecho RA – VB1.

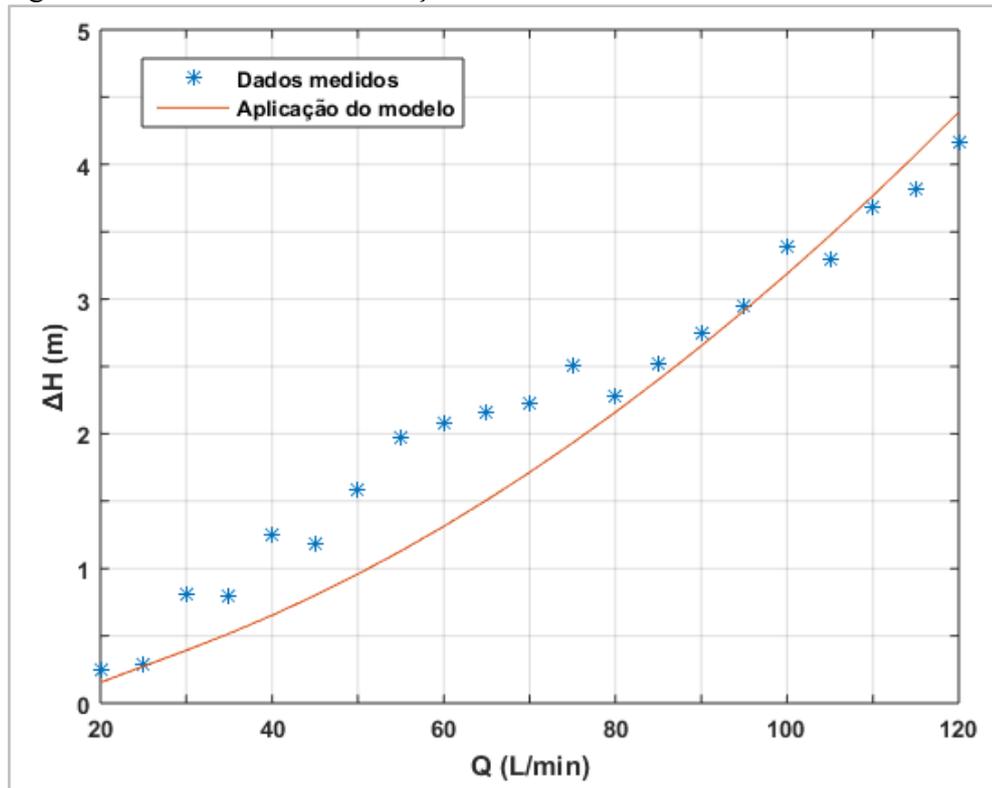


Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 16, o modelo tem uma ótima aderência na mesma faixa de dados existentes na calibração, mostrando sua boa capacidade de generalização. No entanto, com vazões menores que 65 L/min, a curva começa a distar dos dados experimentais, com desvios chegando a 60 cm. Dessa forma, o método possui deficiência quanto à questão da extrapolação, mas ainda representa os dados como um todo, com uma boa eficácia, conforme mostra as funções objetivo.

Aplicando o modelo no trecho MB1 – MB2 (Figura 17), característico da associação em série, a capacidade de expansão foi testada ainda mais, pois os trechos usados não coincidem em nenhuma parte com os da calibração. Para essa medição, o NSE resultou em 0,8583 e o RMSE em 0,4200. Ao se comparar com o RA – VB1, com o mesmo número de medições, nota-se que não houve uma piora nas funções objetivo.

Figura 17 – Aderência da validação do modelo GLUE no trecho MB1 – MB2.



Fonte: autoria própria.

Da mesma forma que na primeira validação, nota-se, pela Figura 17, que houve ótima aderência na mesma faixa de valores da calibração (acima de 65 L/min). Entretanto, os erros novamente se intensificam na extrapolação (descargas mais baixas).

O modelo ainda se mantém justificável, devido à sua boa capacidade de generalização, tendo em vista que, mesmo para dados inéditos, ainda há uma boa aderência. Concomitantemente, a baixa capacidade de extrapolação não tem grande influência, pois se trata de valores mais baixos e pouco significativos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de equipamentos com a capacidade de leitura de pressão positiva em todos os pontos, minimizando os possíveis erros com extrapolação, tendo em vista que o modelo se generalizou bem para a faixa calibrada.

Para uma análise final da calibração do modelo GLUE, foi elaborado um resumo das funções objetivo apresentadas na calibração e na validação do método (Tabela 6).

Tabela 6 – Funções objetivo após a aplicação do modelo GLUE no experimento real.

<b>Situação</b>	<b>NSE</b>	<b>RMSE</b>
<b>Calibração</b>	0,9724	0,0947
<b>Validação 1</b>	0,8808	0,3495
<b>Validação 2</b>	0,8583	0,4200

Fonte: autoria própria.

A partir da Tabela 6, é possível observar que não houve diferenças significativas entre o NSE das duas validações, o que reafirma a boa capacidade de generalização. Como a primeira engloba um trecho com grande parte coincidente ao da calibração, já eram esperados resultados melhores com relação à segunda.

Com relação ao RMSE, as validações apresentaram erros principalmente em relação à faixa de extrapolação. Os erros ultrapassam os 30 cm, mas não interferem muito nos resultados finais, devido às baixas vazões em que se encontram.

Vale-se ressaltar que não é possível comparar as funções objetivo da calibração com a das validações, pois o número de amostras é diferente. É possível observar que a calibração se tornou mais eficaz, através da análise de desvios dos gráficos mostrados. A falta de aderência nas validações, como já citado, deveu-se à baixa capacidade de extrapolação para vazões mais baixas.

A partir dos parâmetros devidamente calibrados, é possível recriar o circuito com uma boa eficácia. Além disso, com o cálculo das perdas de carga, pode-se realizar o ajuste das curvas características, como será visto na próxima subseção.

#### **4.1.3 Otimização das curvas das bombas reais**

Após a verificação dos parâmetros do experimento real, foi possível simular as perdas de carga em cada trecho, pois os desvios observados pelo modelo GLUE foram pequenos, principalmente nas vazões maiores. A partir das perdas, pôde-se obter a altura manométrica de cada bomba para cada vazão, aplicando a equação descrita em (2).

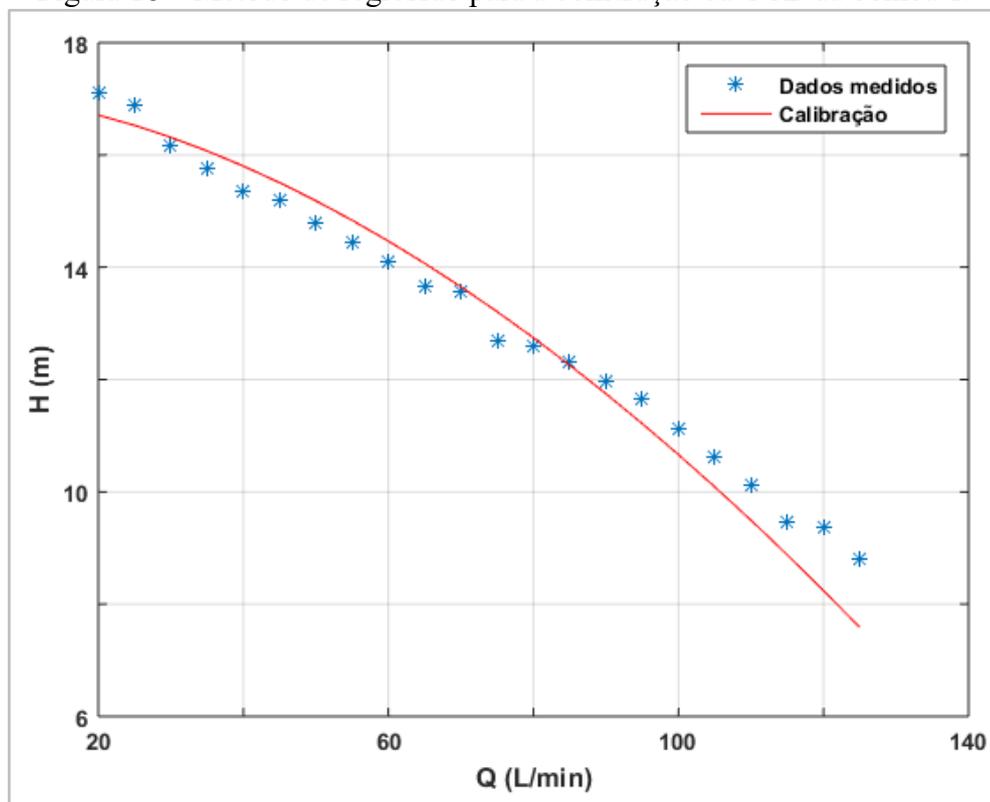
Os dados de altura manométrica obtidos, no entanto, são experimentais, porque dependem da medição dos manômetros e vacuômetros, com precisão de 0,25 mca e -2,5 mmHg, respectivamente. Como já explicado, há um erro associado nas medições experimentais, por mais perfeitas que elas possam parecer. Dessa forma, foi necessária a calibração das curvas pelo método da regressão.

Da mesma forma que na altura manométrica, há um erro associado à potência elétrica disponível, dependendo da medição dos wattímetros, com precisão de 10 W. Para esse parâmetro, como já explicado anteriormente, bastou a regressão linear sem qualquer ajuste na equação base.

Para analisar a eficácia dos métodos de regressão, foi verificada a aderência das curvas correspondentes ao processo de bombeamento, em relação aos dados medidos e calculados. Foram reconstruídas a CCB da bomba 1 (Figura 18), a CCB da bomba 2 (

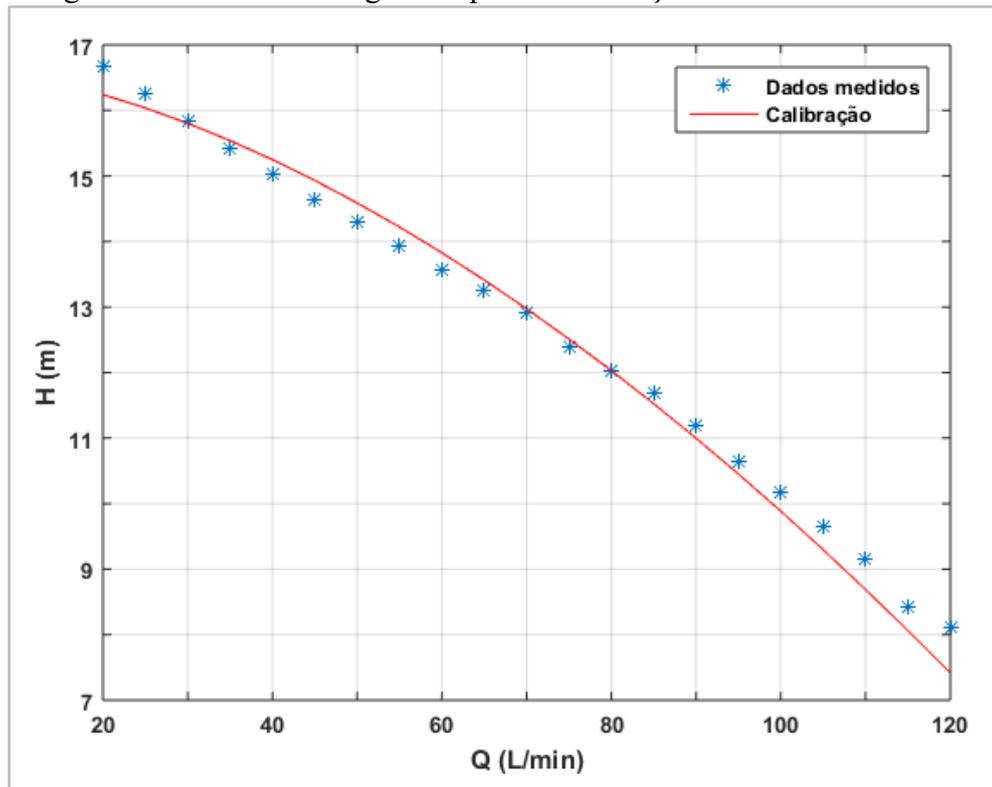
Figura 19) CPD para o fornecimento elétrico à bomba 1 e a CPD (Figura 20) para o fornecimento elétrico à bomba 2 (Figura 21).

Figura 18 – Método de regressão para a construção da CCB da bomba 1.



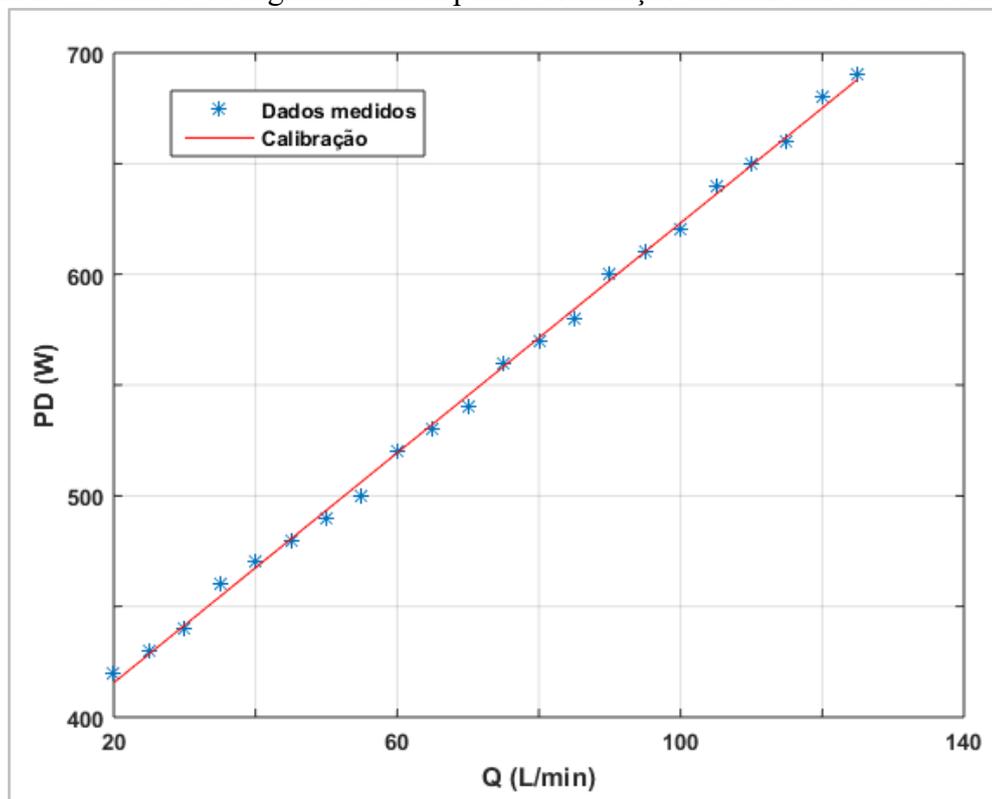
Fonte: autoria própria.

Figura 19 – Método de regressão para a construção da CCB da bomba 2.



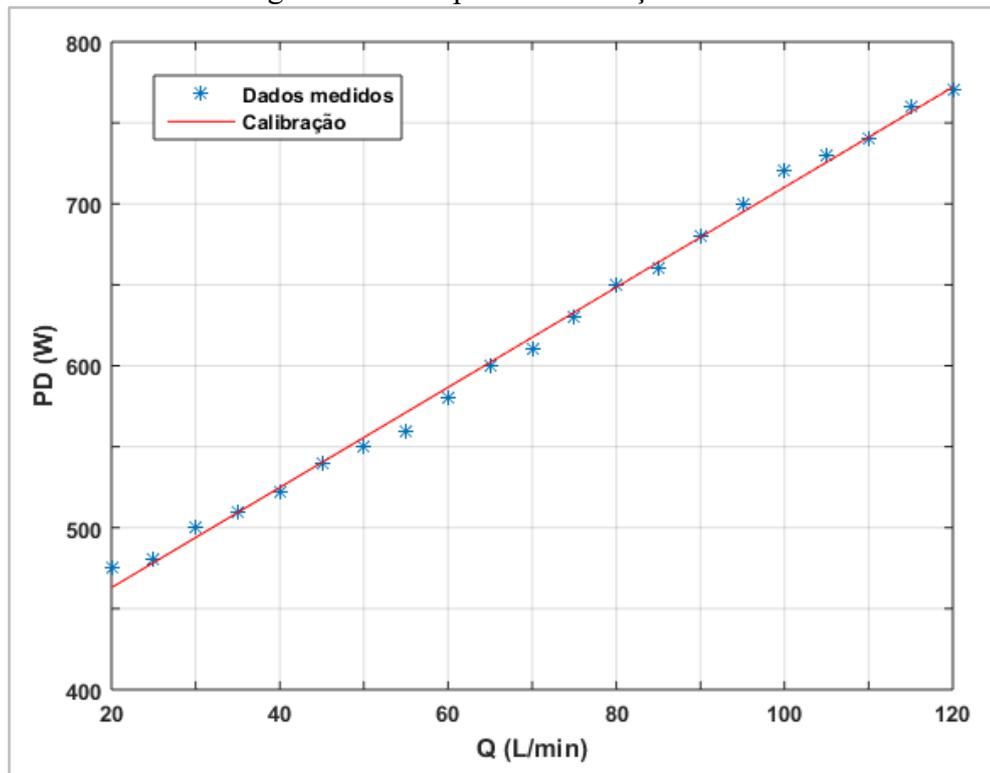
Fonte: autoria própria.

Figura 20 – Método de regressão linear para a construção da CPD associada à bomba 1.



Fonte: autoria própria.

Figura 21 – Método de regressão linear para a construção da CPD associada à bomba 2.



Fonte: autoria própria.

A partir dos gráficos das curvas do processo de bombeamento, pôde-se observar que houve uma excelente aderência em todos os modelos, principalmente com relação à potência disponível (linear). Os valores da CCB se distam em vazões menores, provavelmente devido à falta de extrapolação do modelo GLUE.

Como avaliação final do modelo, foram analisadas as funções objetivo NSE e RMSE para todas as curvas (Tabela 7).

Tabela 7 – Funções objetivo após a aplicação da regressão nas curvas de bombeamento.

Curva	NSE	RMSE
CCB 1	0,9557	0,5146
CCB 2	0,9866	0,2939
CPD 1	0,9984	3,2770
CPD 2	0,9965	5,5337

Fonte: autoria própria.

A partir da Tabela 7, observa-se que o NSE ficou muito próximo de 1 para todos os casos, mostrando sua eficácia, principalmente nas curvas de potência. O erro RMSE também foi próximo de zero, considerando as diferentes ordens de grandeza das medições.

Com as funções objetivo apresentando bons valores, pôde-se garantir a utilização dos modelos para a elaboração do programa.

## 4.2 O LABORATÓRIO VIRTUAL

O laboratório virtual desenvolvido para este projeto foi denominado de *LabHidra.com*, referenciando-se ao próprio laboratório que o desenvolveu e a um ambiente virtual (Figura 22). O programa foi desenvolvido na linguagem *Visual Basic*, através do *software* livre *Visual Studio 2019*.

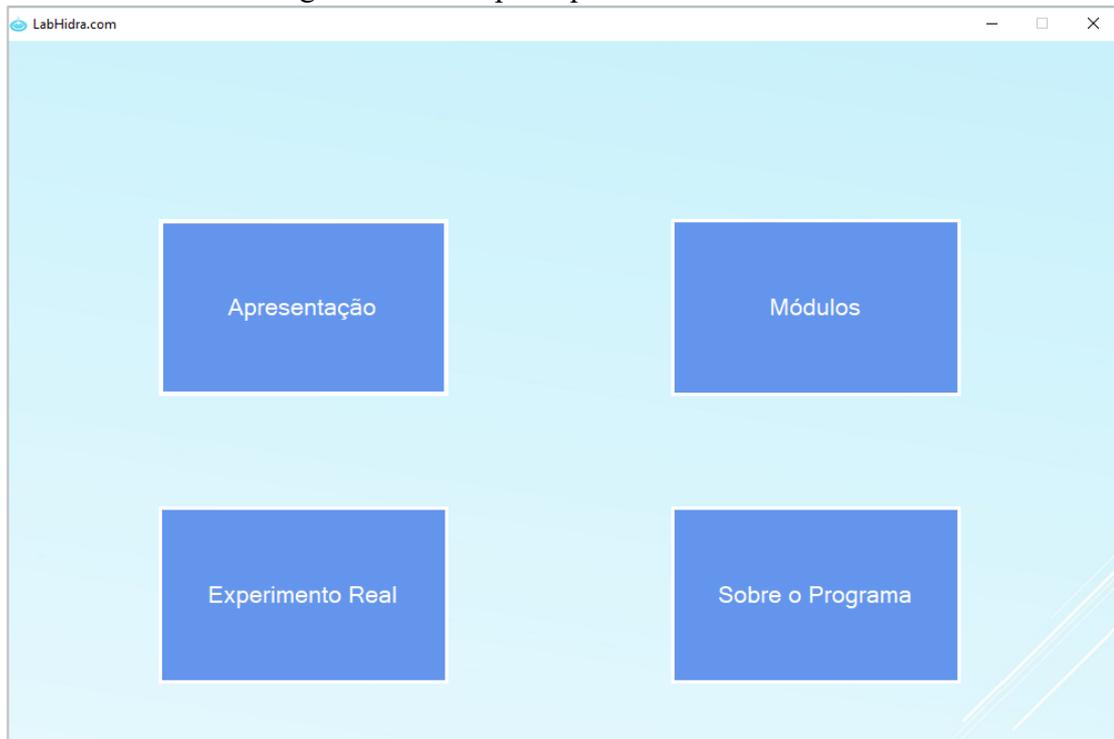
Figura 22 – Logotipo do laboratório virtual desenvolvido neste projeto.



Fonte: autoria própria.

O *LabHidra.com* é composto por quatro grandes seções, buscando detalhar ao máximo possível o experimento real e o virtual, além dos objetivos do programa (Figura 23).

Figura 23 – Tela principal do *LabHidra.com*.



Fonte: autoria própria.

Como observado na Figura 23, o programa é composto por diversas janelas, podendo acioná-las através dos diferentes botões. Essa estrutura tem como objetivo a facilitar a usabilidade do aluno.

Cada uma das grandes seções do programa tem um objetivo específico (Quadro 8), sendo que a essência didática se encontra na seção “Módulos”, já detalhada anteriormente.

Quadro 8 – Resumo das seções do *LabHidra.com*.

<b>Seção</b>	<b>Conteúdo</b>
<b>Apresentação</b>	Apresenta o programa em si, o conteúdo apresentado e os objetivos do <i>LabHidra.com</i> .
<b>Experimento Real</b>	Contém uma representação tridimensional do equipamento real, através de um desenho interativo. O usuário pode clicar em cada um dos equipamentos e descobrir seu nome e função. Por fim, cita e agradece à desenvolvedora EcoEducativa.
<b>Sobre o programa</b>	Fala sobre o desenvolvimento do programa, sobre o criador, sobre o <i>LabHidra</i> e sobre as disciplinas de aplicação. Além disso, indica os parâmetros usados para os cálculos.
<b>Módulos</b>	Essência do <i>LabHidra.com</i> , mostra os experimentos virtuais a serem realizados, o formulário necessário e a explicação de cada procedimento.

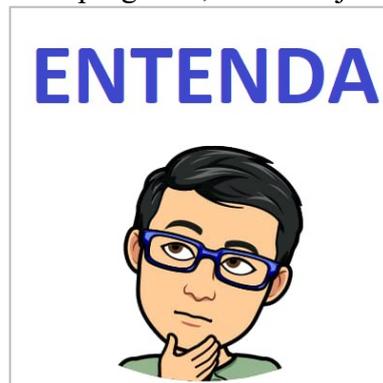
Fonte: autoria própria.

A seção dos módulos é a mais detalhada, exigindo os cálculos apresentados e outras particularidades.

Vale-se ressaltar que, na fase desta dissertação, o programa conta apenas com o experimento de bombeamento e cavitação. Entretanto, busca-se expandi-lo para englobar os demais protótipos que constituem o Laboratório de Hidráulica. Isso ocorre, pois o *LabHidra.com* tem finalidade principalmente didática, não sendo pensado, inicialmente, em realizar simulações avançadas com propósitos científicos.

Quando o aluno realiza uma ação que necessita de explicação sobre um fenômeno hidráulico, um botão para acesso à explicação necessária surge em meio a tela, podendo ser acionado pelo usuário (Figura 24). Dessa forma, o aluno pode, além de realizar o experimento virtual, compreender de forma didática as causas de cada uma das situações, melhorando o processo de aprendizagem.

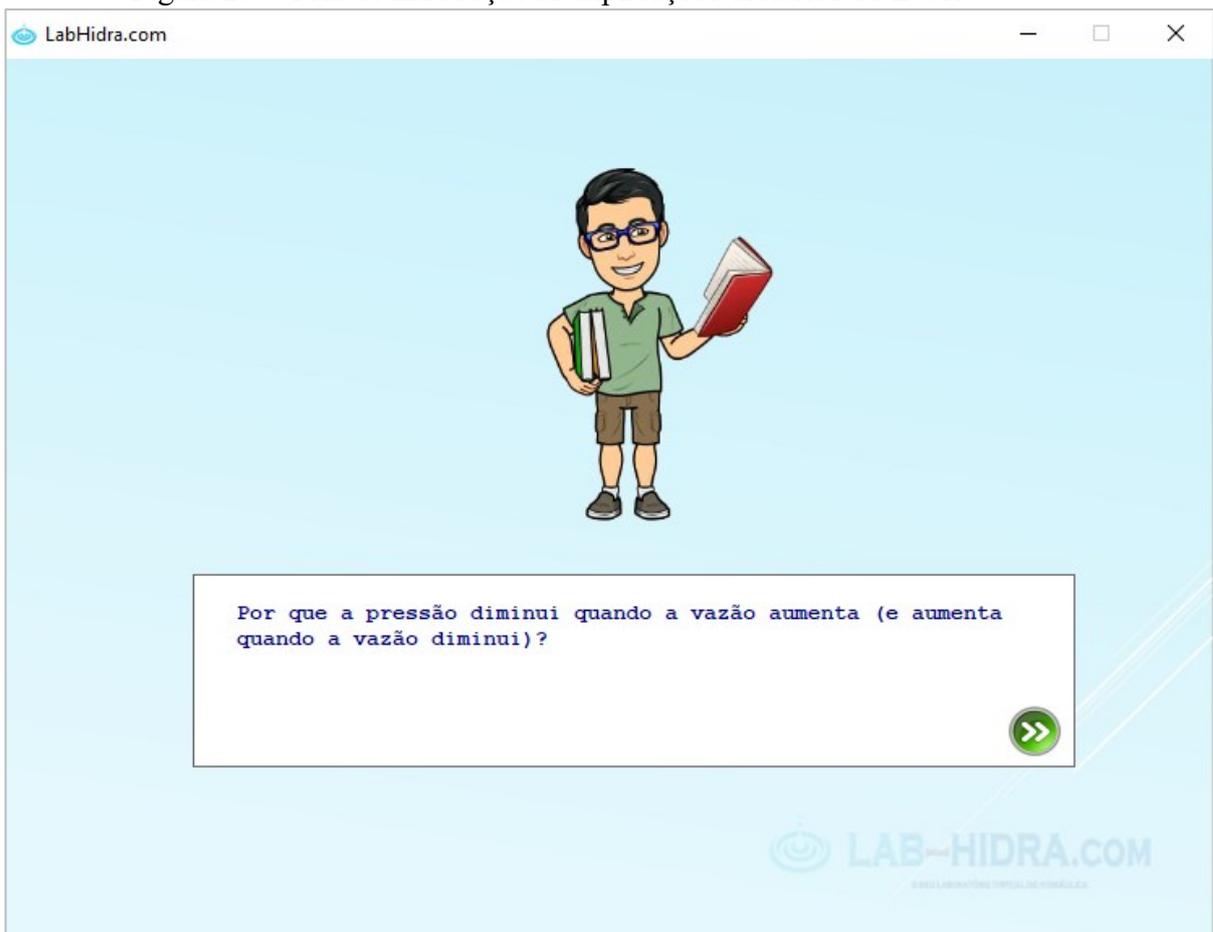
Figura 24 – Botão presente no programa, com o objetivo de acionar explicações.



Fonte: autoria própria.

Após o acionamento do botão de acesso às informações, uma janela de ajuda é aberta automaticamente, buscando dar as explicações necessárias aos alunos (Figura 25).

Figura 25 – Tela de introdução às explicações didáticas do *LabHidra.com*.



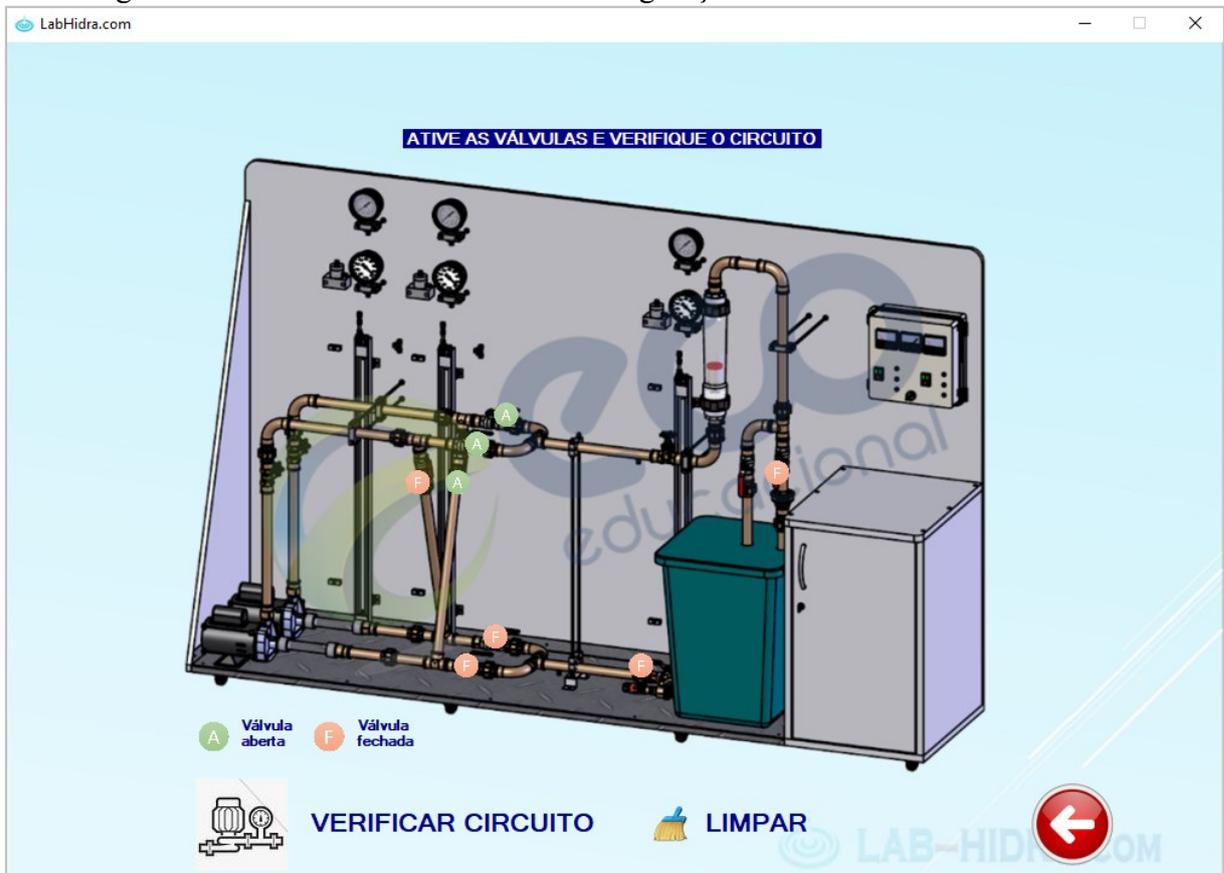
Fonte: autoria própria.

Os resultados de cada um dos módulos virtuais serão detalhados nos tópicos a seguir.

#### 4.2.1 Módulo de configuração do circuito (válvulas)

O módulo de configuração do circuito é o experimento mais simples do *LabHidra.com*, sem a necessidade de realização de cálculos ou visualização de fenômenos físicos. Tem a finalidade apenas de o aluno entender como se configuram os circuitos e as associações através do acionamento de válvulas (Figura 26).

Figura 26 – Tela única do módulo de configuração do circuito do *LabHidra.com*.

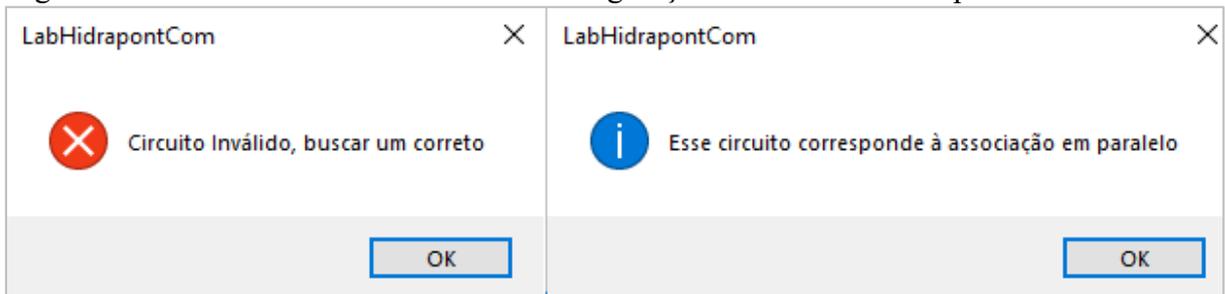


Fonte: autoria própria.

Como pode ser visto na Figura 26, há a indicação de válvulas abertas e fechadas. O usuário pode mudar a condição dos dispositivos, apenas pressionando os botões referentes a cada uma das válvulas.

Após finalizar uma tentativa de configuração, o aluno poderá conferir a validade do circuito através do botão “Verificar Circuito” (Figura 27). A qualquer momento, ele pode fechar todas as válvulas através do “Limpar”.

Figura 27 – Alerta de validade ou não da configuração escolhida emitido pelo *LabHidra.com*.



*Fonte: autoria própria*

A partir da Figura 27, nota-se que, além da validade do circuito, é indicado também o tipo de configuração correspondente.

#### 4.2.2 Módulo de bombeamento

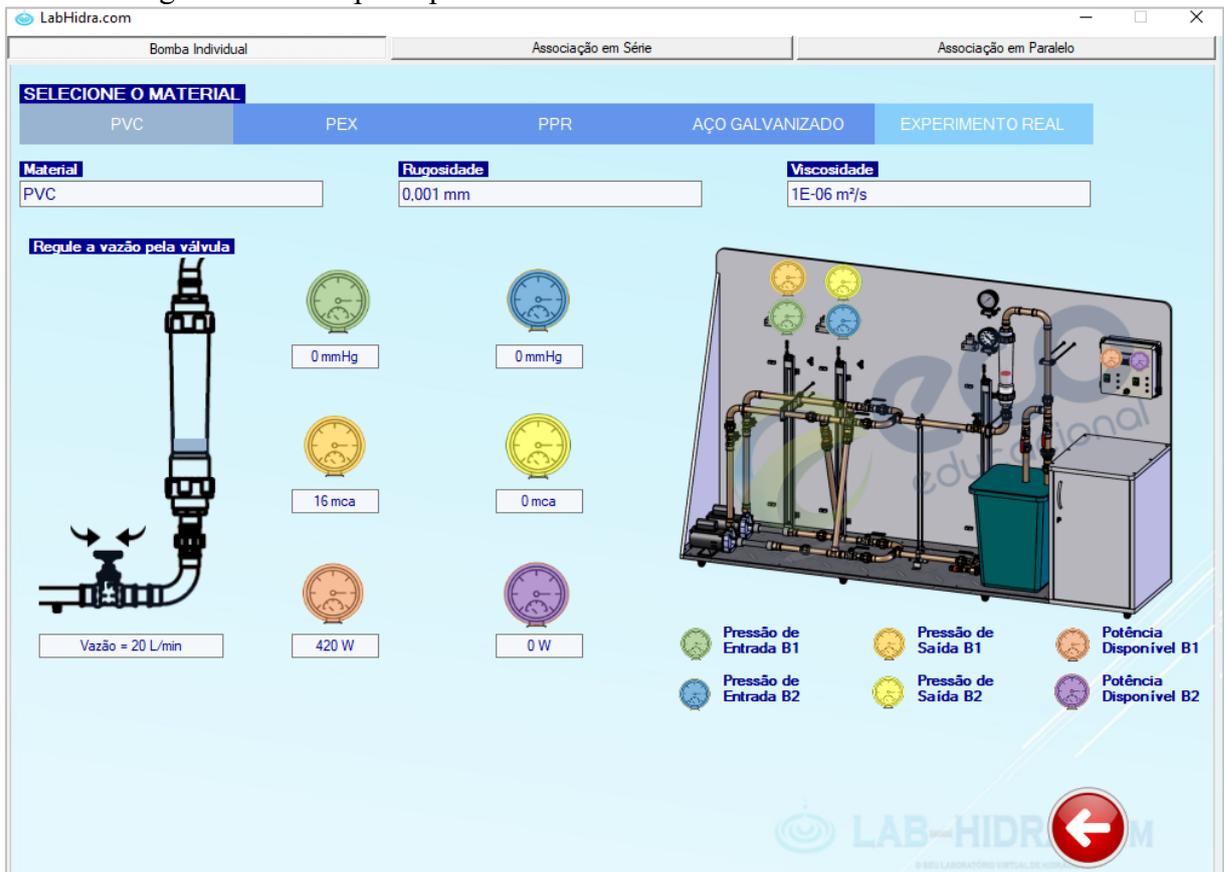
O módulo de bombeamento corresponde ao experimento principal do *LabHidra.com*. Como já citado, nele se realizam as medições de pressão e potência, o que permite ao aluno realizar externamente o traçado das curvas da bomba e das associações e comparar com as fornecidas pelo programa.

No módulo de bombeamento, o aluno basicamente repete o experimento do laboratório real. Entretanto, por poder acessar o programa em casa, há tempo hábil suficiente para a obtenção de mais pontos para a construção das curvas. A nível de comparação, o *LabHidra.com* permite um total de 17 conjuntos de medições, contra as 4 ou 5 que normalmente são realizadas nas aulas práticas.

É possível realizar o mesmo experimento com as diferentes configurações de circuito, isto é, com a bomba individual 1, com a associação em série e com a associação em paralelo.

Todos os valores de pressão e de potência foram obtidos após a geração do modelo matemático de representação do experimento real, discutido anteriormente, atualizando a rugosidade e a viscosidade de acordo com o material correspondente.

A tela principal do módulo de bombeamento contém os medidores de pressão e potência, um desenho tridimensional do experimento real, uma esquematização do rotâmetro, além de botões que permitem a mudança de material (Figura 28) .

Figura 28 – Tela principal do módulo de bombeamento do *LabHidra.com*.

Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 28, é possível obter as pressões e potências referentes a uma determinada vazão. Ao acionar a válvula acima do rotâmetro, o usuário pode aumentar ou reduzir a descarga, o que provoca alterações nos valores.

O adicional em relação ao experimento real, como já citado, está na escolha dos materiais. Todos foram selecionados por serem típicos de instalações hidráulico-prediais, como tubulações de água fria, água quente e reserva técnica de incêndio. Dessa forma, o aluno pode observar a influência das rugosidades de acordo com a escolha (Tabela 8).

Tabela 8 – Rugosidades dos materiais usados no módulo de bombeamento do *LabHidra.com*.

Material	Rugosidade absoluta (mm)
PVC	0,00100
PEX	0,00400
PPR	0,00700
AÇO GALVANIZADO	0,06000

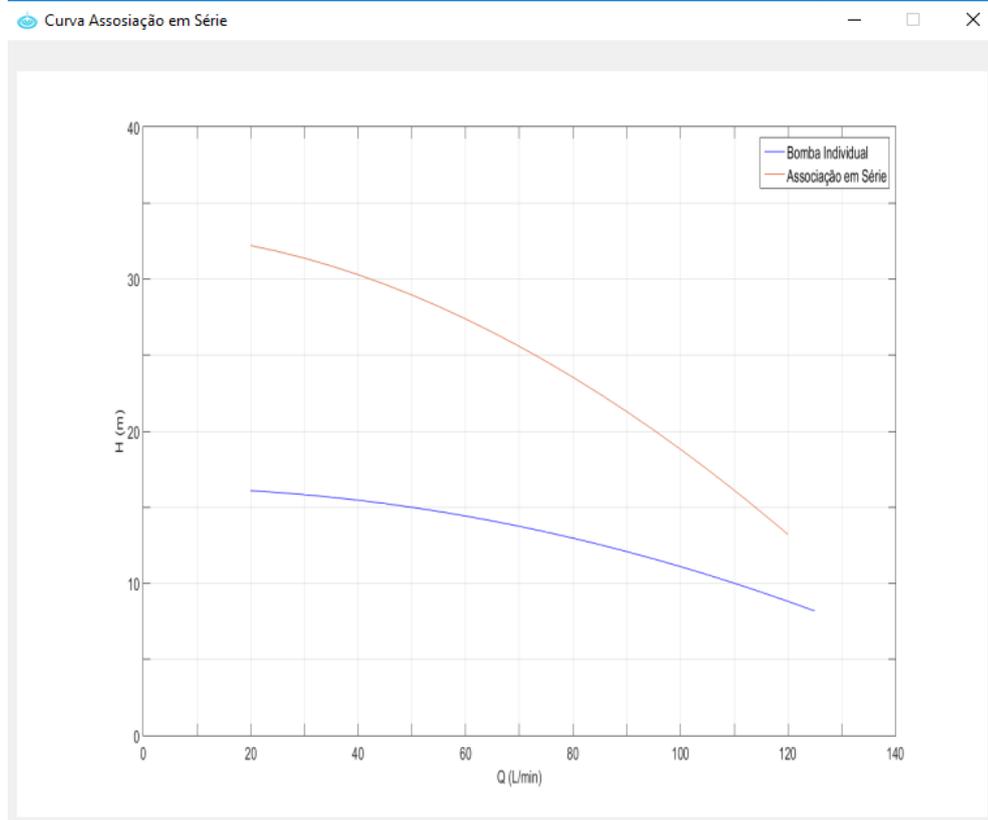
Fonte: Porto (2006), Possamai (2013), cálculos próprios.

Excetuando-se a simulação do experimento real, os materiais foram dispostos em ordem crescente de rugosidade no programa. Assim, o aluno pode verificar gradativamente uma redução na pressão, quando se aumenta o atrito e, conseqüentemente, a perda de carga. É relevante frisar que cada material possui alterações quanto aos comprimentos equivalentes apresentados na Tabela 8, o que influi também na perda de carga e nas pressões.

Para os usuários, foi exposto também o valor de viscosidade cinemática da água, que permanece constante e igual a  $1,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para todos os materiais, exceto o do experimento real, calibrado em  $5,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . É importante observar esse parâmetro, pois, mesmo com uma rugosidade menor que a do Aço Galvanizado, a simulação do experimento real resultou em pressões menores. Isso se dá porque a viscosidade foi calibrada com um valor mais elevado, o que promove um aumento da perda de carga e redução das cargas de pressão.

Em todas as configurações de circuito, é possível conferir os gráficos com valores modelados (Figura 29). O aluno deve realizar o experimento em casa, construir as curvas em uma planilha ou programa em separado, e verificar se houve semelhança com o divulgado pelo *LabHidra.com*.

Figura 29 – Exemplo da CCB individual e da CCB em série geradas pelo *LabHidra.com*.



Fonte: autoria própria.

### 4.2.3 Módulo de cavitação

O módulo de cavitação buscou expandir o experimento já realizado em aula, observando as principais causas do fenômeno e o preciso momento em que o mesmo ocorre.

Dentre os principais problemas apontados no experimento real, destaca-se o escasso tempo em que o processo é exposto aos estudantes, apenas poucos segundos. Isso se dá devido à segurança dos equipamentos, já que o prolongamento pode acarretar na danificação das bombas e tubulações.

Outro problema acerca do experimento real de cavitação é que o protótipo físico não permite a exploração das causas do processo. Em laboratório, há apenas o aumento da vazão e o fechamento de uma válvula simuladora de cavitação, o que não existe em sistemas reais. Em suma, somente expõe o processo, devido ao aumento da perda de carga, em vez de trabalhar as causas.

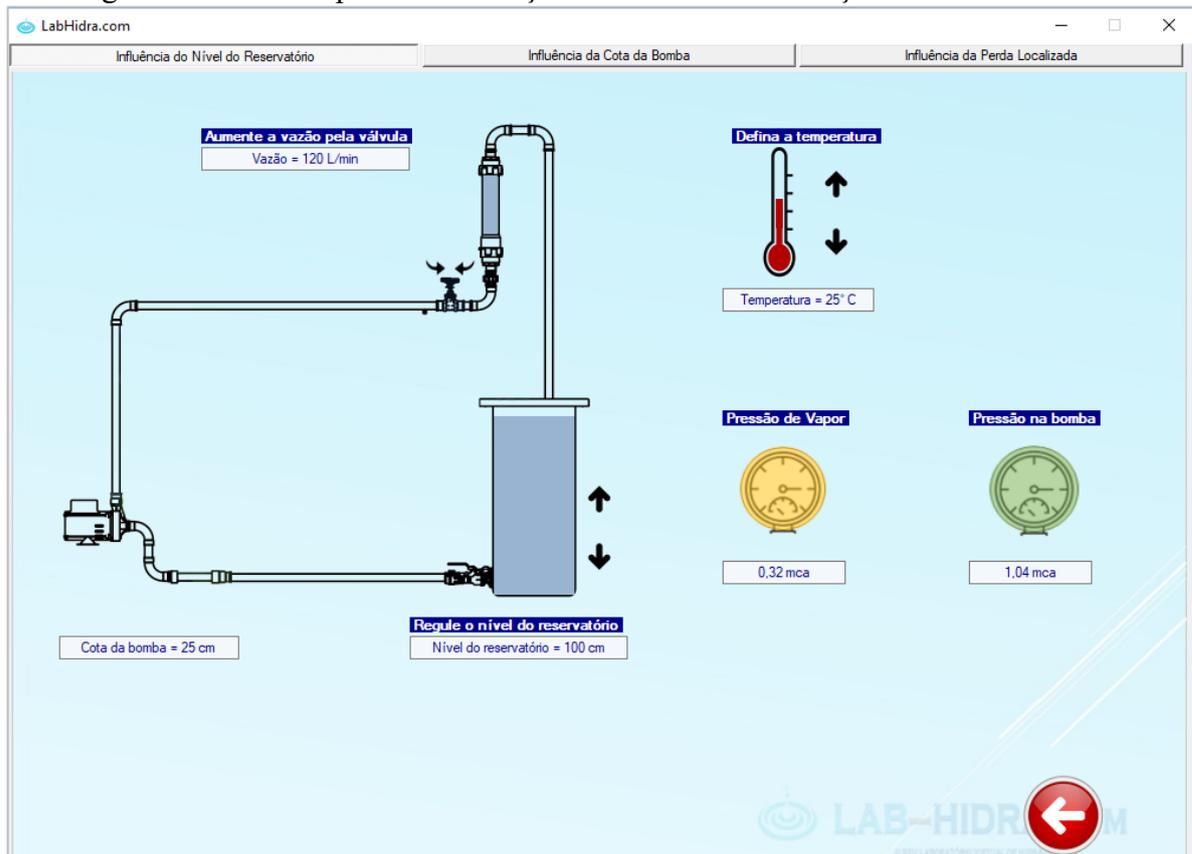
Dessa forma, o *LabHidra.com* buscou indicar outras possíveis causas da cavitação, expondo os riscos de bombas não-afogadas, decorrentes do posicionamento ou do baixo nível do reservatório. Além disso, permitiu a mudança de temperatura, mostrando que locais mais quentes tem uma maior pressão de vapor e, por conseguinte, uma maior suscetibilidade ao fenômeno.

Nessa primeira versão do programa, não foi utilizada a influência da altitude, devido à necessidade de um banco de dados (de escolha de cidades, por exemplo). Como já citado, o uso de tabelas no *Visual Studio 2019* resume-se principalmente na mostra dos dados, não realizando os cálculos com as células.

Cada uma das subseções do módulo de cavitação buscou explorar uma das causas do fenômeno. A separação se deu para facilitar o entendimento por parte dos estudantes e permitir explicações isoladas. Dessa forma, os alunos podem focar em cada um dos influentes, sem que outro externo colabore para os resultados.

A primeira subseção aprofunda principalmente a influência do nível do reservatório no fenômeno de cavitação. Aborda, de forma preliminar, como o aumento da temperatura e da vazão tornam mais propício a ocorrência do fenômeno, devido, respectivamente, ao aumento da pressão de vapor e redução da pressão absoluta do escoamento (Figura 30).

Figura 30 – Tela da primeira subseção do módulo de cavitação do *LabHidra.com*.



Fonte: autoria própria.

Como observado, o aluno pode definir uma temperatura, o que gerará uma pressão absoluta de vapor no manômetro amarelo. Ao modificar a vazão, uma pressão absoluta do escoamento será indicada no manômetro verde. Com a disposição dos manômetros, o estudante tem a possibilidade de comparar, a cada ação, a pressão absoluta do escoamento no ponto crítico (antes da bomba) com a pressão de vapor. Essa disposição facilita o entendimento do fenômeno.

Por fim, pode-se reduzir o nível do reservatório, diminuindo a pressão do escoamento até o ponto da cavitação. Nesse momento, uma imagem de um alarme aparecerá, com um som associado, indicando o fenômeno (Figura 31).

Figura 31 – Imagem de alerta no momento de ocorrência da cavitação.

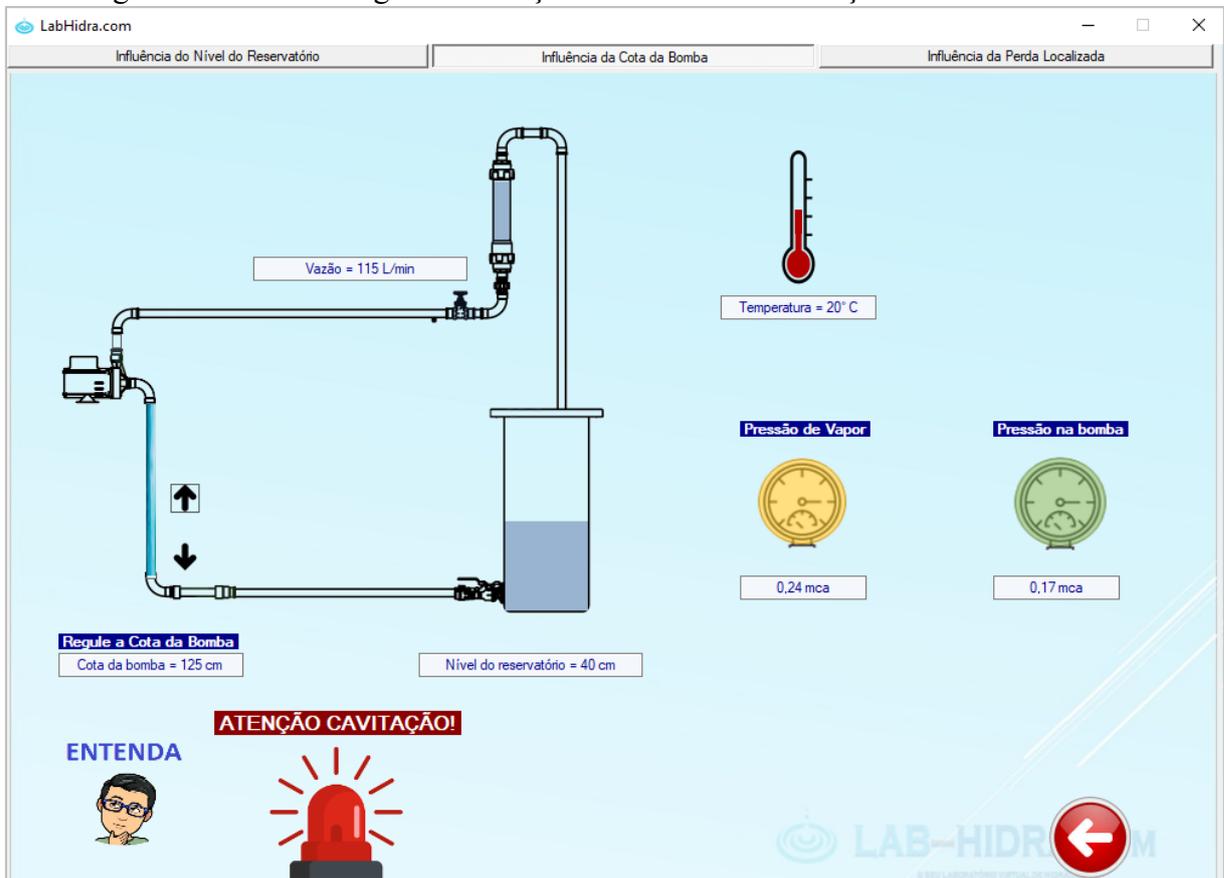


Fonte: autoria própria.

Nessa subseção em particular, o aluno pode observar que o nível d'água do reservatório estará abaixo da cota da bomba quando ocorre a cavitação. Isso expõe, além dos riscos do uso de bombas não afogadas, os problemas de se trabalhar com níveis muito baixos de reservatórios.

A segunda subseção envolve a influência da elevação da cota da bomba, frisando nos riscos de projetos com bombas não afogadas. Nessa etapa, a temperatura e a vazão já estão previamente definidas, permitindo ao aluno apenas focar na posição do equipamento (Figura 32).

Figura 32 – Tela da segunda subseção do módulo de cavitação do *LabHidra.com*.

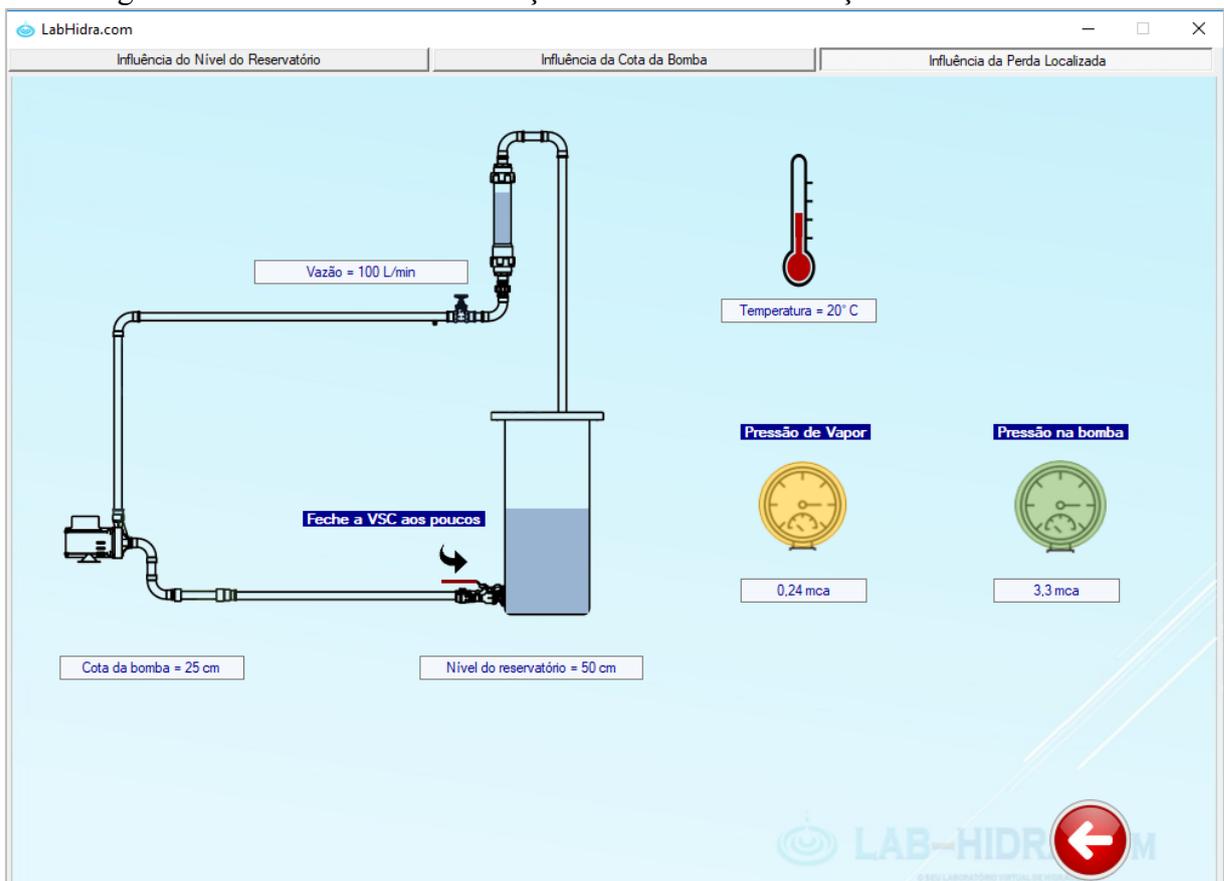


Fonte: autoria própria.

A partir da Figura 32, observa-se que a bomba já se encontra em uma posição não afogada, em uma cota mais elevada que o reservatório na ocorrência de cavitação. Da mesma forma que na primeira subseção, é possível observar os manômetros correspondentes às pressões absolutas de vapor e do escoamento. Isso permite que o estudante observe exatamente o ponto de ocorrência do fenômeno, representado pelo alarme e pelas bolhas a montante da bomba.

Na última subseção, como já citado, há a repetição do experimento no laboratório real, com o estudante podendo fechar a válvula simuladora de cavitação até a ocorrência do fenômeno. Esse segmento tem como objetivo indicar que circuitos com elevadas perdas de carga podem intensificar a cavitação, sugerindo configurar bombas próximas aos reservatórios. Como na segunda subseção, a temperatura e a vazão já estarão fixadas, de forma ao aluno apenas se concentrar em um fator influente do fenômeno (Figura 33).

Figura 33 – Tela da terceira subseção do módulo de cavitação do *LabHidra.com*.



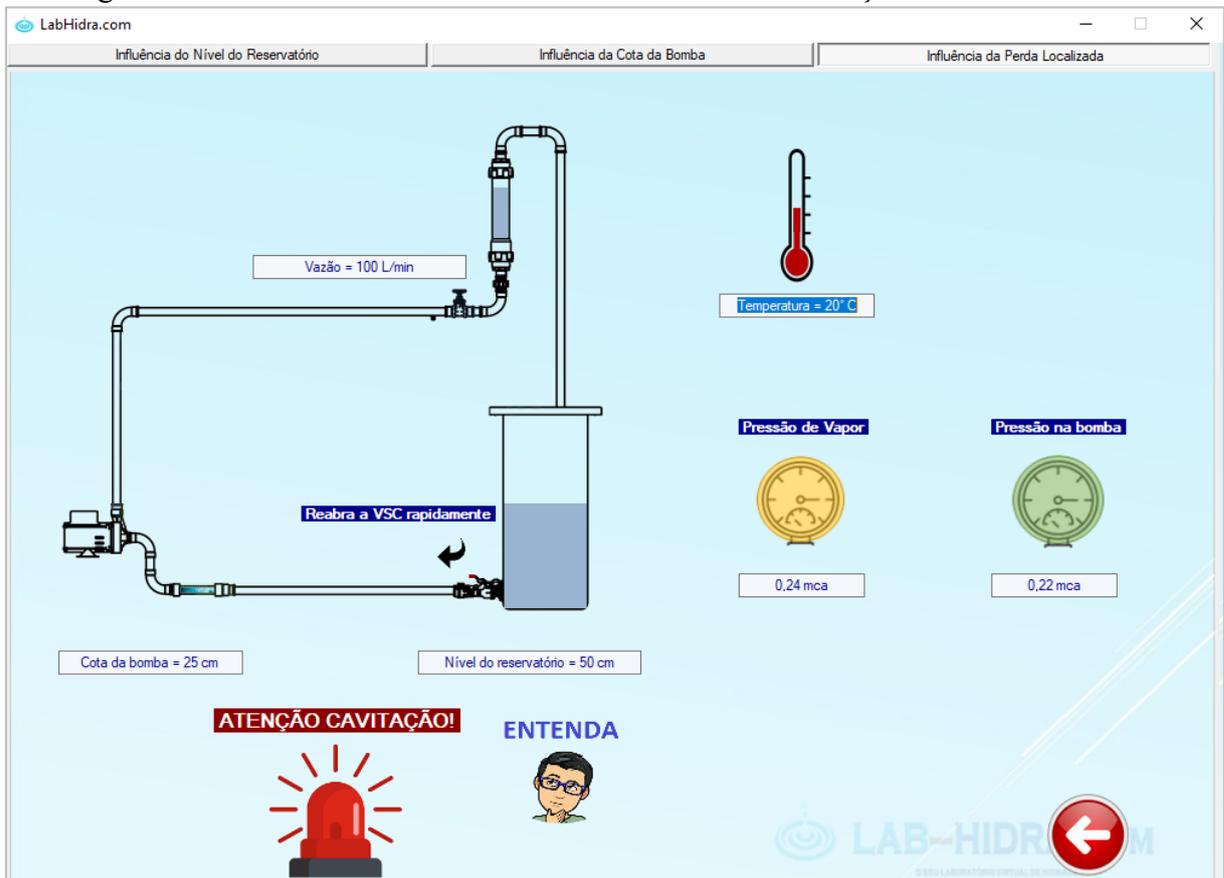
Fonte: autoria própria.

Da mesma forma que nas demais subseções, o aluno pode analisar a pressão de vapor e a do escoamento através dos manômetros. Vale-se ressaltar que o aumento da perda de carga localizada foi estimado apenas com fins didáticos, não tendo relação com a posição da válvula no programa.

No ponto de ocorrência da cavitação, há um aviso para o estudante reabrir a válvula rapidamente, já que o fenômeno poderia danificar as bombas. Essa indicação frisa a seriedade

da cavitação e que o projetista de um sistema de bombeamento deve evitá-la sempre que possível (Figura 34).

Figura 34 – Aviso de reabertura da VSC no módulo de cavitação do *LabHidra.com*.



Fonte: autoria própria.

### 4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DO PROGRAMA

A análise da viabilidade do programa se deu através de testes de hipóteses de média, como já citado. Para tal, considerou-se um nível de significância inicial de 5%, isto é, o erro máximo aceitável para se rejeitar a hipótese  $H_1$  é de 5%. Concomitantemente, considera-se a confiabilidade das análises de 95%.

O primeiro teste comparou as médias dos estudantes nos diferentes grupos e subgrupos, acerca da atividade avaliativa do experimento de bombeamento. Dessa forma, observou-se, em suma, se os alunos que usaram o laboratório virtual como complemento ao real obtiveram melhores desempenho que os que só frequentaram a aula prática.

O segundo teste observou a aceitação do programa através de um questionário opinativo acerca dos dois experimentos. Dessa forma, avaliou-se se as respostas referentes ao experimento virtual foram mais favoráveis que as do laboratório real.

#### 4.3.1 Análise de desempenho dos estudantes

No total, 40 estudantes foram submetidos aos testes de hipóteses de comparação de médias, com relação ao experimento de bombeamento. As notas foram baseadas em uma atividade avaliativa, aplicada às turmas de Hidráulica (ENS5101) e Hidráulica 1 (ENS7008). Para evitar plágios, as perguntas realizadas para as duas turmas foram semelhantes em termos de conteúdo, mas diferentes nas alternativas.

De forma preliminar, podem-se observar as características descritivas do desempenho dos alunos, avaliando média, desvio, máximos e mínimos (Tabela 9).

Tabela 9 – Características descritivas do desempenho dos grupos na atividade avaliativa.

<b>Grupo</b>	<b>Número de Alunos</b>	<b>Média das notas</b>	<b>Desvio padrão das notas</b>	<b>Nota máxima</b>	<b>Nota mínima</b>
<b>Total</b>	40	7,55 ± 0,44	1,38 ± 0,39	10,00	4,25
<b>B</b>	15	6,95 ± 0,68	1,23 ± 0,33	8,50	4,50
<b>A</b>	25	7,91 ± 0,57	1,37 ± 0,57	10,00	4,25
<b>A1</b>	9	7,86 ± 1,46	1,90 ± 0,62	10,00	4,50
<b>A2</b>	8	8,12 ± 1,11	1,33 ± 0,45	9,50	6,50
<b>A3</b>	8	7,75 ± 0,55	0,65 ± 0,22	8,50	6,50

Fonte: autoria própria.

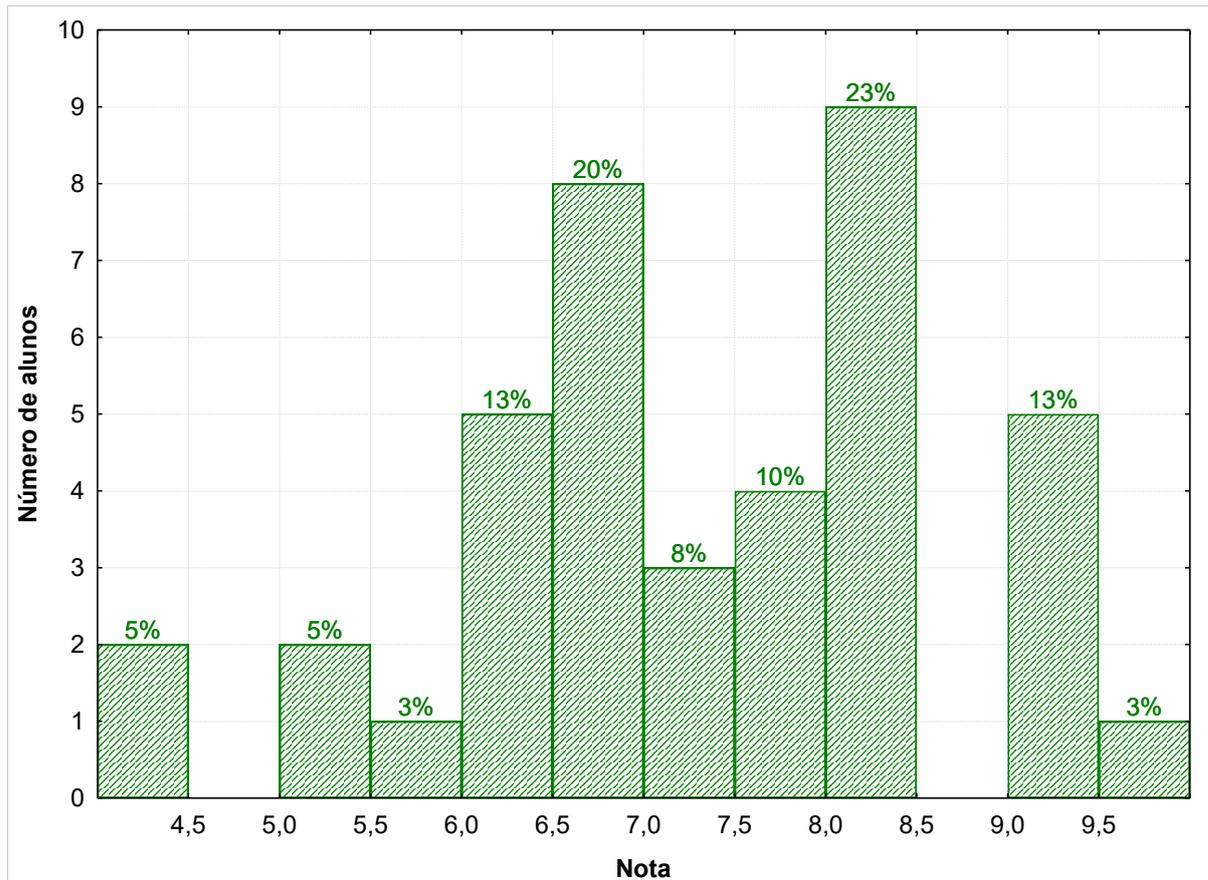
Ao analisar a Tabela 9, nota-se que a média dos alunos que usaram o laboratório virtual (A), independente da forma (A1, A2, A3), é aparentemente superior à média dos que não usaram (B). Nota-se que a nota máxima dos que não usaram foi de 8,50, contra 10,00 de quem usou. Isso indica que talvez o laboratório real propicie uma melhora na aprendizagem, mas o virtual complementa os conteúdos, preenchendo as lacunas. A comprovação de superioridade ou não, no entanto, só é dada a partir de um teste de hipótese de comparação de médias.

Comparando os subgrupos, não há aparente diferença entre quem usou em casa (A3) e aqueles que usaram em casa e em sala (A1) e aqueles que só usaram durante a aula expositi-

va (A2). Isso mostra um indício que a explicação do programa não deve ter tido uma grande influência no desempenho dos estudantes.

Também pode-se avaliar o desempenho de forma descritiva, através da análise de um histograma de distribuição (Figura 35).

Figura 35 – Histograma de distribuição de notas dos estudantes de Hidráulica e Hidráulica 1.

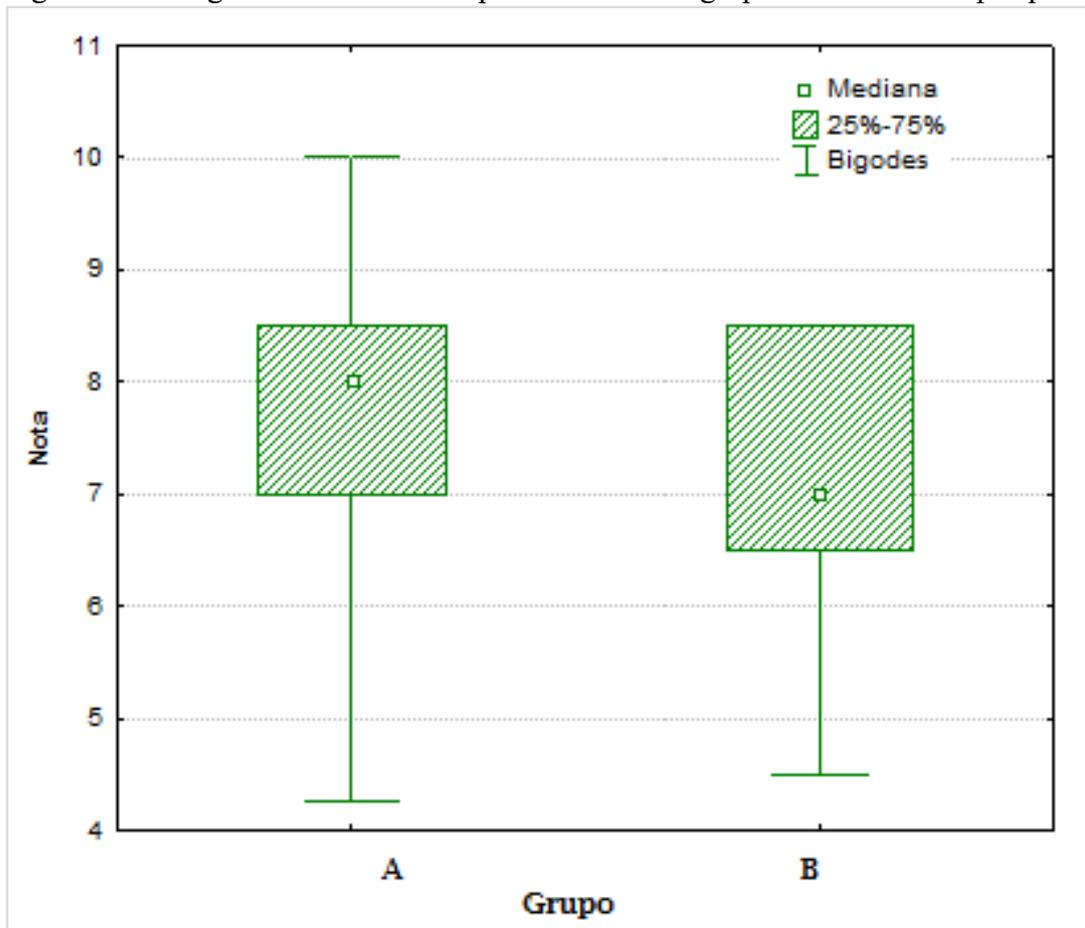


Fonte: autoria própria.

A partir do histograma da Figura 35, é possível observar que aparentemente, há duas distribuições normais associadas, provavelmente decorrente das diferenças entre as duas turmas. Analisando de forma geral, a maior parte das notas estão entre 6,0 e 8,5, com poucas muito baixas e quase nenhuma nota máxima.

A comparação de distribuição das notas entre os dois grupos (A e B) é mais facilmente observada através de um diagrama de caixas. Com esse tipo de gráfico, pode-se verificar de forma visual, as tendências, os máximos e mínimos e as faixas onde está a maior concentração dos valores para cada uma das situações (Figura 36).

Figura 36 – Diagrama de caixas comparativo entre os grupos analisados na pesquisa.



Fonte: autoria própria.

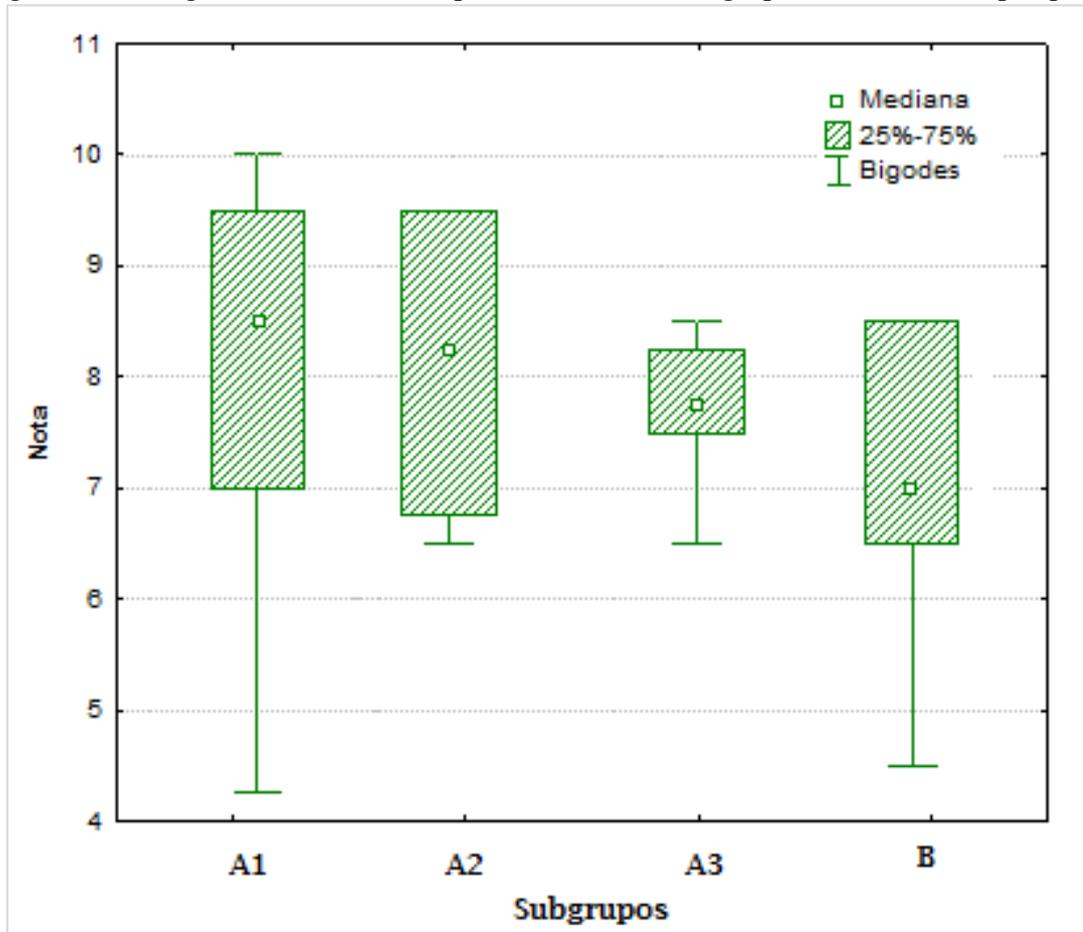
Ao se analisar a Figura 36, nota-se que 50% das notas dos alunos que usaram o laboratório virtual como complemento ao real (A) encontra-se na faixa de 7,0 e 8,5; enquanto que 25% ficaram entre 8,5 e 10,0. Em contrapartida, 75% das notas dos que não usaram (B) ficaram entre 6,5 e 8,5 e 50% ficou entre 4,5 e 7,0,

A verificação do diagrama de caixas dá indícios que o uso do programa acaba por permitir uma maior expansão do conteúdo, possibilitando que os estudantes atinjam notas próximas ou iguais à máxima. Isto é, há uma tendência aparente de que o detalhamento apresentado por um laboratório virtual permite um desempenho mais elevado. No entanto, como já ressaltado anteriormente, são necessárias ainda análises estatísticas para comprovar o aumento ou não da média dos alunos.

Vale-se ressaltar que, como já explicado, a aula expositiva do laboratório virtual pode acabar influenciando o desempenho dos estudantes. Dessa forma, faz-se necessário tam-

bém observar o diagrama de caixas correspondentes aos subgrupos, destacando-se as formas de uso do programa (Figura 37).

Figura 37 – Diagrama de caixas comparativo entre os subgrupos analisados na pesquisa.



Fonte: autoria própria.

A partir da observação da Figura 37, nota-se que, aparentemente, o uso em sala contribuiu para que os estudantes atingissem notas mais altas. Pode-se verificar que 50% dos alunos do subgrupo A1 e A2 ficaram com desempenhos maior ou igual a 8,25; enquanto que 50% dos alunos que usaram somente em casa (A3) ficou entre 7,75 e 8,25. Isso indica que possivelmente a explicação na aula expositiva contribuiu para uma melhora no entendimento. Além disso, reforça a ideia de Nedic (2003) que o laboratório virtual deve complementar e não substituir.

Comparando os alunos que usaram em casa (A3) com os que não usaram (B), nota-se que, ainda há uma aparente melhora no desempenho, com 75% das notas do que usaram em casa acima de 7,75.

Vale-se ressaltar que a amostragem não é grande o suficiente para obter conclusões mais precisas.

A tendência estatística se deu através de um teste de hipóteses de médias. A análise compara a medida *t-student* para a confiabilidade  $(1-\alpha)$  e o grau de liberdade da amostra, com a medida *t-student* dos dados observados (Tabela 10). As análises foram do tipo unilateral à direita, comparando-se o desempenho dos que usaram (A) com os que não usaram (B); dos que usaram em casa (A3) com os que não usaram; dos que usaram em sala (A2) com os que usaram em casa (A3) e dos que usaram em casa e em sala (A1) com os que usaram somente em casa (A3).

Tabela 10 – Resultado do teste de hipóteses de desempenho comparativo entre os grupos.

Hipótese H1	GL <sub>1</sub> +GL <sub>2</sub> =GL	$t_{0,95}$	$t_{obs}$	Resultado
$\mu_A > \mu_B$	14+24=38	1,69	2,29	H1
$\mu_{A3} > \mu_B$	7+14=21	1,72	1,78	H1
$\mu_{A2} > \mu_{A3}$	7+7=14	1,76	0,77	H0
$\mu_{A1} > \mu_{A3}$	7+8=15	1,75	0,17	H0

Fonte: autoria própria.

A partir da Tabela 10, pôde-se obter a confirmação estatística de que, com 95% de confiabilidade, a utilização do laboratório virtual contribuiu para a melhora no desempenho dos alunos. Isso reforça a importância da aplicação de tecnologia no ensino e como ela pode impulsionar a melhora no conhecimento dos estudantes.

Comparando o não uso do programa (B) com o uso somente em casa (A3), também se obteve uma confirmação estatística, com 95% de confiabilidade, de uma melhora. Isso demonstra que somente a repetição do experimento real já acaba por ajudar na melhora do entendimento.

Ao se aplicar o teste comparando os que usaram em casa (A3) com os que usaram em sala (A2) e com os que usaram em casa e em sala (A1), a hipótese vencedora foi a H0 em ambos. Isso indica que, com 5% de probabilidade de erro, não houve confirmação estatística que a explicação na aula expositiva contribuiu para a melhora da nota.

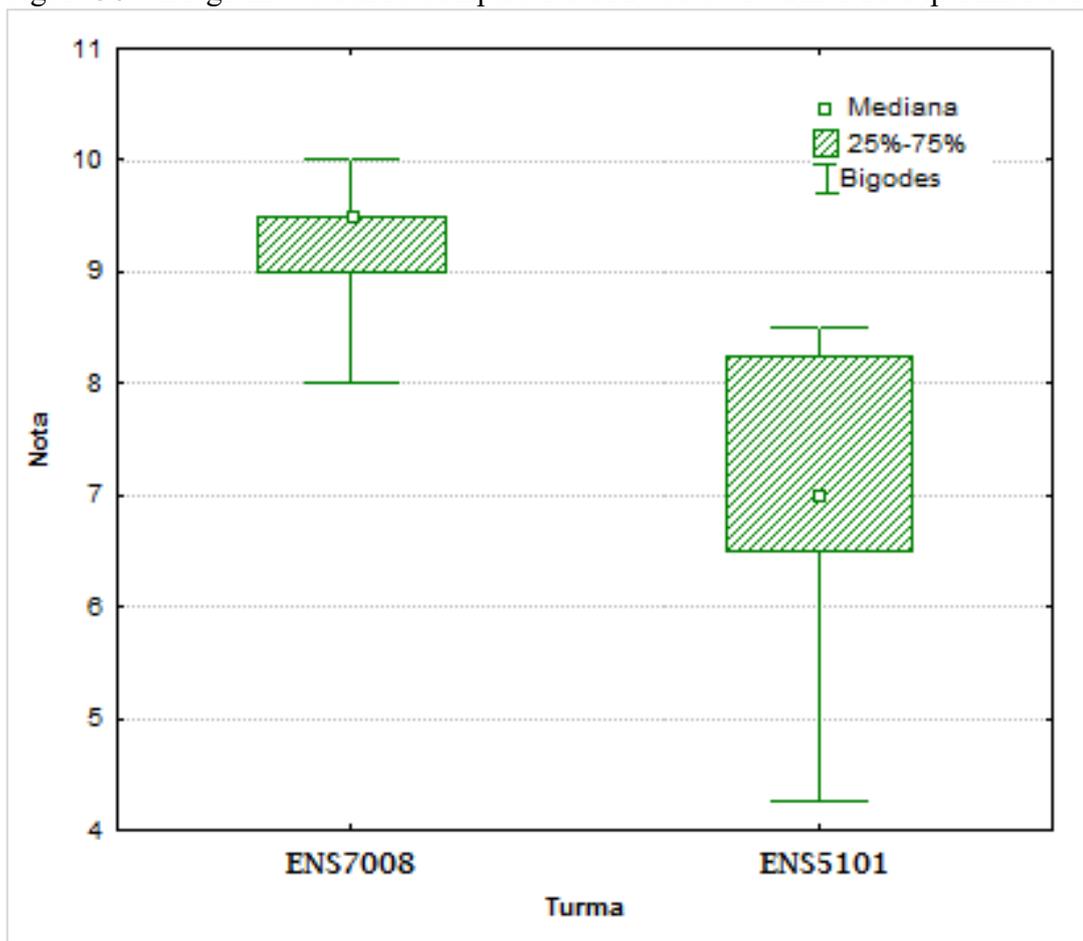
Vale-se ressaltar que o teste resultar em H0 simplesmente indica que a hipótese H1 não foi confirmada. Não é possível afirmar que a aplicação em sala não tenha tido qualquer influência. Apenas não houve comprovação estatística para o nível de significância adotado.

### 4.3.2 Aplicação de fator corretivo para a análise de desempenho

A comprovação estatística mostra indícios de que a hipótese que se quer provar está correta. No entanto, há fatores externos que podem contribuir para uma modificação dos resultados. Podem-se citar as diferenças inerentes às próprias turmas (ENS7008 e ENS5101), que possuem quantidade de alunos distintas e objetivos divergentes, de acordo com o curso de graduação a qual estão situados.

Para analisar a diferença entre as turmas, foram utilizadas, como objeto base, as notas obtidas na atividade avaliativa referente ao experimento 1 (perda de carga), em que não havia laboratório virtual associado. Como comparação preliminar, foram observados os diagramas de caixa relativos a cada turma (Figura 38).

Figura 38 – Diagrama de caixas comparativo entre as duas turmas no experimento 1.



Fonte: autoria própria.

A partir da análise Figura 38, está claro o melhor desempenho da turma ENS7008 em relação ao da ENS5101 no experimento de perda de carga. Todas as notas da primeira foram

maiores ou iguais a 8,00 e 75% maiores ou iguais a 9,00. Em contrapartida, a maior nota da segunda foi 8,50, com 50% entre 6,50 e 8,25.

A diferenciação foi confirmada a partir de um teste de hipótese unilateral à direita, verificando se as notas do experimento 1 da turma ENS7008 foram superiores às da ENS5101 (Tabela 11).

Tabela 11 – Resultado do teste de hipótese de desempenho comparativo entre as turmas.

Hipótese H1	GL <sub>1</sub> +GL <sub>2</sub> =GL	$t_{0,95}$	$t_{obs}$	Resultado
$\mu_{ENS7008} > \mu_{ENS5101}$	14+24=38	1,69	2,29	H1

Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Tabela 11, o desempenho no experimento de perda de carga dos alunos da turma ENS7008 foi superior aos da ENS5101, com uma confiabilidade de 95%. Independentemente dos motivos que ocasionaram essa diferença, calculou-se um fator corretivo, utilizando as médias amostrais das turmas no experimento de perda de carga, conforme está descrito em (24).

$$f_C = \frac{\mu_{ENS7008}}{\mu_{ENS5101}} \quad (24)$$

O fator corretivo foi calculado em 1,10. Dessa forma, as notas da turma ENS5101 para o experimento de bombeamento foram aumentadas em 10% no cálculo para comparação estatística. A aplicação do fator corretivo torna mais crível a análise, buscando eliminar um dos interferentes externos.

Após a aplicação do fator corretivo, pode-se repetir os testes de hipótese de comparação de médias entre os grupos e subgrupos (Tabela 12).

Tabela 12 – Resultado ajustados do teste de desempenho comparativo entre os grupos.

Hipótese H1	GL <sub>1</sub> +GL <sub>2</sub> =GL	$t_{0,95}$	$t_{obs}$	Resultado
$\mu_A > \mu_B$	14+24=38	1,69	1,86	H1
$\mu_{A3} > \mu_B$	7+14=21	1,72	1,78	H1
$\mu_{A2} > \mu_{A3}$	7+7=14	1,76	0,32	H0
$\mu_{A1} > \mu_{A3}$	7+8=15	1,75	0,39	H0

Fonte: autoria própria.

A partir da Tabela 12, é possível observar que, mesmo com o fator ajustado, não houve mudança nos resultados, para uma confiabilidade de 95%. Dessa forma, pode-se afirmar com maior segurança que o uso do laboratório virtual como complemento ao real acaba por melhorar o desempenho dos estudantes e, portanto, deve ser estimulado.

### 4.3.3 Análise opinativa dos estudantes

O questionário de opinião foi aplicado a todos os alunos de Hidráulica 1 e Hidráulica. Como a participação foi voluntária, apenas 33 estudantes deixaram sua opinião acerca do experimento real e do laboratório virtual. Destes, apenas um resolveu não opinar sobre o real e sete não responderam sobre o virtual (por não terem tido contato ou por vontade própria).

Como já citado, as respostas foram dadas em expressões adjetivas de intensidade (“Ajudou muito”, “Ajudou pouco”, “Não ajudou”, “Deixou mais confuso”), referentes separadamente aos dois tipos de experimentos (real ou virtual). No total foram seis perguntas para cada experimento.

De forma preliminar, avaliou-se a quantidade de cada uma das respostas de cada adjetivo para cada um dos experimentos (Tabela 13).

Tabela 13 – Quantidade de respostas adjetivas para o experimento real e virtual.

<b>Resposta</b>	<b>Experimento real</b>	<b>Laboratório virtual</b>
<b>Ajudou muito</b>	99 (52%)	88 (81%)
<b>Ajudou pouco</b>	74 (39%)	18 (17%)
<b>Não ajudou</b>	19 (9%)	2 (2%)
<b>Deixou mais confuso</b>	0 (0%)	0 (0%)
<b>TOTAL DE ALUNOS</b>	<b>32</b>	<b>18</b>

Fonte: autoria própria.

Como a quantidade de estudantes que responderam cada questionário é diferente, não há motivos para comparação entre o número de respostas. Entretanto, pela Tabela 13, nota-se que a porcentagem de aceitação é aparentemente muito maior para o laboratório virtual. Isso contribui para a ideia de que os alunos assimilaram mais o conteúdo após o uso do programa, reforçando a importância da inserção tecnológica no ensino.

Observando os dados, nenhum aluno apresentou uma resposta negativa, isto é, nem o laboratório real nem o virtual atrapalharam o entendimento. Entretanto, pode-se observar que

somente 2% das respostas indicou que o programa não ajudou a compreender certo conteúdo. Dessa forma, pode-se reforçar que o uso do *LabHidra.com* como complemento ajudou a completar o que a aula prática não conseguiu.

Para a realização da avaliação estatística pelo teste de hipótese de médias, foram calculadas as pontuações apresentadas no Quadro 7. Assim, o conjunto de respostas para cada aluno em cada questionário foi transformado em pontos. Quanto maior os pontos, mais elevada é a aceitação.

Como início da análise das pontuações, realizou-se um balanço descritivo das informações estatísticas, como média dos pontos, desvio padrão, pontuação máxima e mínima (Tabela 14).

Tabela 14 – Características descritivas da pontuação de cada grupo de questionário.

<b>Questionário</b>	<b>Número de Alunos</b>	<b>Média dos pontos</b>	<b>Desvio padrão dos pontos</b>	<b>Pontuação máxima</b>	<b>Pontuação mínima</b>
<b>Real</b>	32	8,5 ± 0,9	2,4 ± 0,5	12	3
<b>Virtual</b>	18	10,7 ± 0,7	1,3 ± 0,3	12	9

Fonte: autoria própria.

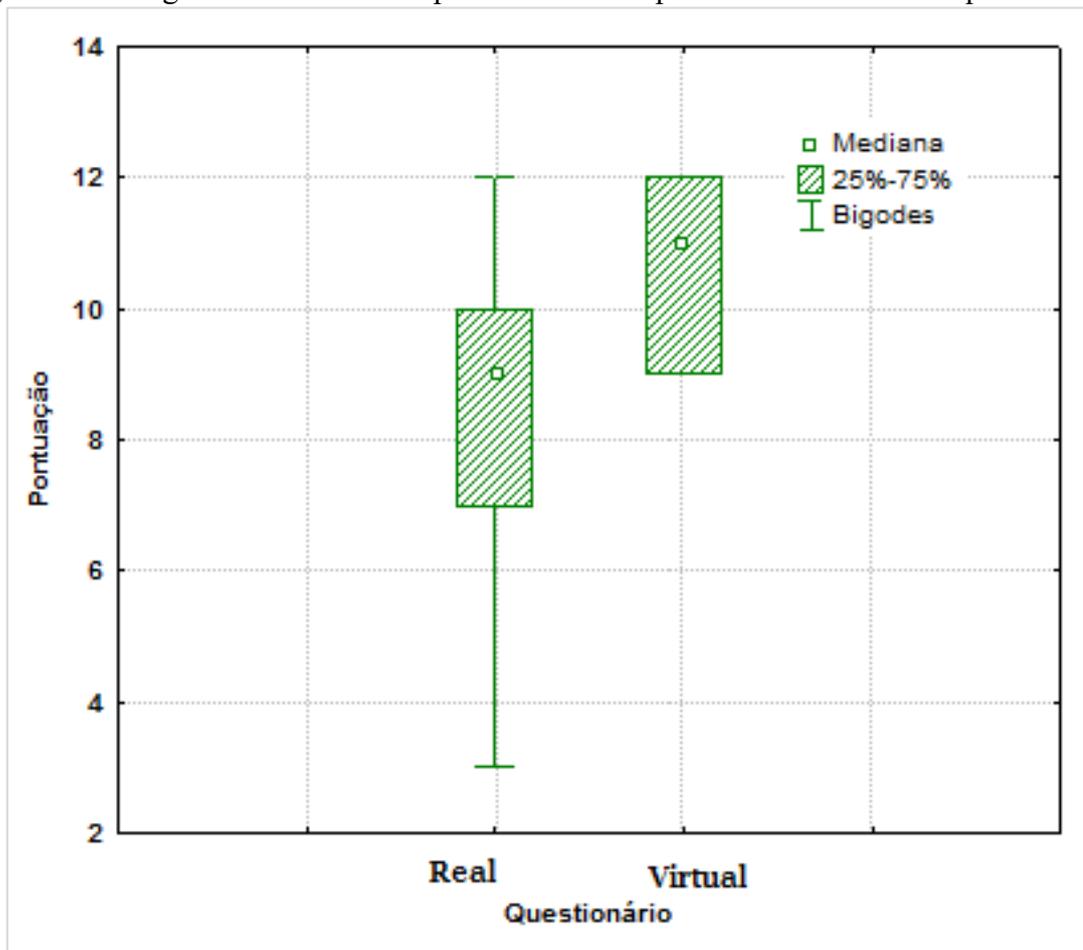
Como mostrado na Tabela 14, a média dos pontos aparentemente foi maior o questionário sobre o experimento virtual. Assim, há indícios de uma maior aceitação dos estudantes com relação ao programa e de uma maior compreensão dos conhecimentos.

Ainda observando o experimento real, nota-se que há uma grande variabilidade de dados (dobro do desvio padrão do experimento virtual). Isso vai ao encontro com o que foi discutido sobre as limitações de espaço. Nas aulas em conjunto, nem todos conseguem acompanhar o ritmo ou visualizar, devido à grande quantidade de pessoas em um laboratório pequeno.

Observando as pontuações máximas, nota-se que ambos tiveram alunos que responderam com a maior aceitação possível (12). Todavia, através das mínimas, verifica-se que a pontuação mais baixa do laboratório real foi aparentemente muito inferior. Como dito anteriormente, há mais mostras que um experimento virtual pode complementar o conhecimento obtido em uma aula prática.

Como análise visual, foram construídos os diagramas de caixa comparativo entre a pontuação dos dois questionários (Figura 39).

Figura 39 – Diagrama de caixas comparativo entre os pontos de cada um dos questionários.



Fonte: autoria própria.

Ao avaliar a Figura 39, é possível observar a aparente melhora considerável na aceitação dos alunos que usaram o laboratório virtual. 100% do conjunto de respostas referentes ao virtual alcançou entre 9 e 12 pontos (pelo menos três respostas “ajudou muito”), contra 50% do real para a mesma faixa.

No diagrama de caixas é possível observar novamente o aumento da variabilidade no experimento real, reforçando a ideia de que a dispersão de foco e a limitação de espaço dificultam a compreensão geral.

Analisando apenas o questionário referente ao experimento real, nota-se que 25% das respostas dos alunos apresentou pontuações de aceitação inferiores a entre 2 e 7 (máximo de 3 “ajudou muito”). Portanto, há indícios de que o experimento real, por si só, acaba por não oferecer todo o entendimento que os alunos precisam.

Todos os indícios apresentados, contudo, necessitam de uma comprovação estatística. O teste de hipóteses de média unilateral à direita foi realizado comparando a pontuação dos dois questionários (Tabela 15).

Tabela 15 – Resultado do teste de hipótese opinativo comparativo entre os experimentos.

Hipótese H1	$GL_1+GL_2=GL$	$t_{0,95}$	$t_{obs}$	Resultado
$\mu_{virtual} > \mu_{real}$	17+31=48	1,68	3,79	H1

Fonte: autoria própria.

Com os resultados apresentados na Tabela 15, observa-se, com 95% de confiança, que, de fato, houve uma maior aceitação dos alunos ao laboratório virtual. A título de comparação, caso fosse aumentada a confiabilidade para 99,9%, a hipótese vencedora ainda seria a H1.

Ao analisar os testes de hipóteses realizados, tanto pela análise de desempenho, quanto a de aceitação; nota-se que a aplicação de um laboratório virtual pode contribuir para a melhora do entendimento de um experimento real.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A calibração dos parâmetros do experimento real através do modelo GLUE foi eficiente, chegando a um NSE de 0,9724 para a calibração e 0,8808 e 0,8583 para as validações. Dessa forma, para esquemas simplificados como processos de bombeamento com circuitos pequenos, não houve a necessidade de métodos de otimização mais complexos. Portanto, é válida a simulação de um experimento real, buscando representá-lo com a maior fidelidade possível.

A otimização das curvas características e de potência pelo método de regressão também se mostrou eficaz, com o NSE de todos acima de 0,95. Assim, foi possível ajustar os dados experimentais à um modelo simplificado.

A construção do programa permitiu uma maior visualização de todo o experimento de bombeamento, podendo realizar ações inviáveis num laboratório real. Como os equipamentos virtuais dependem apenas de códigos e programações, com os comandos corretos, é possível permitir modificações de elementos como o material da tubulação, posição da bomba dentre outros fatores.

A linguagem utilizada foi o *Visual Basic* no *Visual Studio 2019* e permitiu a criação de um laboratório praticamente completo. A limitação encontra-se no uso de banco de dados, além da construção de gráficos. Devido à grande complexidade na realização de cálculos com tabelas no *Visual Studio 2019*, optou-se por repetir os procedimentos matemáticos no código

de programação para gerar os dados como pressão e potência. Além disso, os gráficos tiveram que ser importados do *Matlab*, devido à falta de recursos do programa.

Quanto à viabilidade da aplicação do programa no ensino de Engenharia, os testes de hipótese confirmaram, com 95% de confiabilidade, que o uso do programa atrelado ao laboratório real acabou por melhorar o desempenho dos alunos.

Quanto à opinião dos estudantes que utilizaram o experimento, testes de hipótese de média confirmaram, com até 99,9% de confiabilidade, que as opiniões acerca do experimento virtual foram positivamente melhores as do experimento real.

As análises estatísticas, no entanto, foram prejudicadas devido à baixa amostragem, que acaba por não produzir resultados com a significância desejada.

Apesar da viabilidade na melhora do desempenho e ótima aceitação dos alunos, o laboratório virtual não deve ser visto como um substituto do experimento real. A presença dos futuros profissionais em laboratórios de equipamentos físico é fundamental para eles confrontarem pessoalmente uma parte do que vão encontrar no mercado de trabalho. O uso de tecnologia no ensino deve colaborar para uma melhora na aprendizagem e no ensino, preenchendo os pontos falhos e conectando os conteúdos.

Em suma, a construção de um laboratório virtual não deve ser interpretada apenas como a elaboração de um mero programa de computador. Suas consequências são partes de um segmento de pesquisadores da educação que buscam um aprimoramento dos métodos de ensino. Em uma era digital, se adaptar às novas gerações e transcender o ambiente de sala de aula é fundamental. A construção do conhecimento não é algo estático. É preciso uma constante atualização, mantendo os pontos positivos do passado e visando a novos. Os resultados estatísticos mostraram que é possível sim mudar, sem abandonar o que já foi feito.

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho, como um todo, conseguiu atingir a seu objetivo geral, de desenvolvimento, implementação e avaliação de um laboratório virtual para aplicação no ensino de Hidráulica. Com relação aos objetivos específicos, também houve resultados satisfatórios.

O modelo matemático gerado pelo método GLUE atendeu às necessidades, com problemas apenas com relação à extrapolação de vazão. Recomenda-se, portanto, testar se modelos mais complexos se produzem um ganho nas funções objetivo e resolvem as defasagens apresentadas. Além disso, com mais tempo hábil, sugere-se buscar equipamentos que consigam medir pressões positivas e negativas, aumentando o intervalo de calibração.

Com relação à elaboração de um laboratório virtual, o *Visual Studio 2019* foi suficiente para criar uma boa interface, mas com problemas com gráficos e banco de dados. Sugere-se o uso de programas mais completos, como o *LabView*, por exemplo, caso haja possibilidade de financiamento para programas pagos.

Por fim, foi possível observar a melhoria de desempenho e de aceitação dos alunos com a aplicação do laboratório virtual, mediante a análises estatísticas. Recomenda-se uma amostragem maior para testar se é possível provar a viabilidade ao ampliar o nível de confiança.

Em geral, sugere-se, para trabalhos futuros, buscar novos métodos de ensino, novas possibilidades de inserção de tecnologia, novas parcerias e tentativas com os alunos. Somente pensando à frente, se conseguirá atingir um ponto ótimo na curva de ensino e aprendizagem

## REFERÊNCIAS

ABBASZADEH, Peyman; MORADKHANI, Hamid; YAN, Hongxiang. Enhancing hydrologic data assimilation by evolutionary Particle Filter and Markov Chain Monte Carlo. **Advances In Water Resources**, [s.l.], v. 111, p.192-204, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.011>.

ALLIGNE, Sébastien et al. Cavitation surge modelling in Francis turbine draft tube. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 52, n. 3, p.39-411, 17 mar. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2013.854847>.

ARAÚJO, ALANA RANIELE NASCIMENTO. Determinação da curva equivalente para uma associação de bombas BCS em série. **TCC (Graduação), Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal**, v. 62, 2015.

BAJIC, Branko. Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 41, n. 1, p.87-96, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221680309499932>.

BIGGS, John B. **Student Approaches to Learning and Studying. Research Monograph.** Australian Council for Educational Research Ltd., Radford House, Frederick St., Hawthorn 3122, Australia., 1987

BIGGS, John Burville. Why and how do Hong Kong students learn?: Using the learning and study process questionnaires. 1992.

BOOK, Wayne J; KOEPPEN, Kyle; ROUSE, Matt. Virtual access hydraulic experiment for system dynamics and controls education. **Mechatronics**, [s.l.], v. 12, n. 2, p.261-270, mar. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0957-4158\(01\)00066-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0957-4158(01)00066-6).

BOX, M. J.. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods. **The Computer Journal**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.42-52, 1 abr. 1965. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/8.1.42>.

CANT, Richard V.. Water supply and sewerage in a small island environment: The Bahamian Experience. **Small Islands: Marine Science and Sustainable Development**, [s.l.], p.329-340, 1996. American Geophysical Union. <http://dx.doi.org/10.1029/ce051p0329>.

CAPSIS. **Optimisation under capsis**. Disponível em:

<<http://capsis.cirad.fr/capsis/documentation/optimisation>>. Acesso em: 23 maio 2013.

CARVALHO, Jacinto A. et al. Desempenho de bomba centrífuga operando com água residuária do processamento do café. 2008.

CARVALHO JÚNIOR, Roberto de. **Instalações hidráulicas e o projeto de arquitetura**. Editora Blucher, 2017.

CHAN, Yinq-Chleh et al. Development of virtual equipment for a hydraulic mechanics experiment. **Tsinghua science and technology**, v. 13, n. S1, p. 261-265, 2008.

CHANSON, H.. Enhancing Students' Motivation in the Undergraduate Teaching of Hydraulic Engineering: Role of Field Works. **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice**, [s.l.], v. 130, n. 4, p.259-268, out. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1052-3928\(2004\)130:4\(259\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1052-3928(2004)130:4(259)).

CHIN, Christine; BROWN, David E.. Learning in Science: A Comparison of Deep and Surface Approaches. **Journal Of Research In Science Teaching**, [s.l.], v. 37, n. 2, p.109-138, fev. 2000. Wiley. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2736\(200002\)37:23.0.co;2-7](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1098-2736(200002)37:23.0.co;2-7).

COLL, César. El currículo escolar en el marco de la nueva ecología del aprendizaje. **Aula de Innovación Educativa**, 2013, num. 219, p. 31-36, 2013.

COOLEY, Richard L.. Incorporation of prior information on parameters into nonlinear regression groundwater flow models: 1. Theory. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 18, n. 4, p.965-976, ago. 1982. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/wr018i004p00965>.

COOLEY, Richard L.. A Comparison of Several Methods of Solving Nonlinear Regression Groundwater Flow Problems. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 21, n. 10, p.1525-1538, out. 1985. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/wr021i010p01525>.

DAYARATNE, St; PERERA, Bjc. Calibration of urban stormwater drainage models using hydrograph modelling. **Urban Water Journal**, [s.l.], v. 1, n. 4, p.283-297, dez. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15730620412331299057>.

DISKIN, M. H.. Definition and Uses of the Linear Regression Model. *Water Resources Research*, [s.l.], v. 6, n. 6, p.1668-1673, dez. 1970. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/wr006i006p01668>.

ENGLISH, Linda; LUCKETT, Peter; MLADENOVIC, Rosina. Encouraging a deep approach to learning through curriculum design. **Accounting Education**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.461-488, dez. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/0963928042000306828>.

ENTWISTLE, Noel; RAMSDEN, Paul. **Understanding student learning (routledge revivals)**. Routledge, 2015.

FEIMAN-NEMSER, Sharon; REMILLARD, Janine. **Perspectives on learning to teach**. East Lansing, MI: National Center for Research on Teacher Learning, Michigan State University, 1995.

FOSTER, Timothy; BROZOVIĆ, Nicholas; BUTLER, Adrian P.. Modeling irrigation behavior in groundwater systems. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 50, n. 8, p.6370-6389, ago. 2014. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2014wr015620>.

FOX, Dennis. Personal theories of teaching. **Studies In Higher Education**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.151-163, jan. 1983. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/03075078312331379014>

FRASER, Campbell. The influence of personal characteristics on effectiveness of construction site managers. **Construction Management And Economics**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.29-36, jan. 2000. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/014461900370924>.

FRASER, D. M. et al. Enhancing the learning of fluid mechanics using computer simulations. **Journal of Engineering Education**, v. 96, n. 4, p. 381-388, 2007.

FREITAS, Raquel Aparecida Marra da Madeira. Ensino por problemas: uma abordagem para o desenvolvimento do aluno. **Educação e Pesquisa**, v. 38, n. 2, p. 403-418, 2012.

FREY, W. R. et al. Modeling the thermosphere as a driven-dissipative thermodynamic system. **Space Weather**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.132-142, mar. 2014. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2013sw001014>.

FRIEDMAN, Peggy; ALLEY, Robert. Learning/teaching styles: Applying the principles. **Theory Into Practice**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.77-81, jan. 1984. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00405848409543093>.

GAO, Zhenguo et al. Virtual hydraulic experiments in courseware: 2D virtual circuits and 3D virtual equipments. **Computer Applications In Engineering Education**, [s.l.], v. 19, n. 2, p.315-326, 21 abr. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/cae.20313>.

GOMES, Cristiano Mauro Assis. Abordagem profunda e abordagem superficial à aprendizagem: diferentes perspectivas do rendimento escolar. **Psicologia: reflexão e crítica**, v. 24, n. 3, p. 438-447, 2011.

HALL, Matthew; RAMSAY, Alan; RAVEN, John. Changing the learning environment to promote deep learning approaches in first-year accounting students. **Accounting Education**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.489-505, dez. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/0963928042000306837>.

HAMMITT, F. G.. CAVITATION DAMAGE SCALE EFFECTS-STATE OF ART SUMMARIZATION. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.1-17, jan. 1975. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221687509499717>.

HANSEN, Edmund. The role of interactive video technology in higher education: Case study and a proposed framework. **Educational Technology**, v. 30, n. 9, p. 13-21, 1990.

HAUPT, Randy L.; HAUPT, Sue Ellen. **Practical genetic algorithms**. John Wiley & Sons, 2004.

HEUVELMANS, Griet; MUYS, Bart; FEYEN, Jan. Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 319, n. 1-4, p.245-265, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.030>.

HODGE, Hess; HINTON, H. Scott; LIGHTNER, Michael. Virtual Circuit Laboratory\*. **Journal Of Engineering Education**, [s.l.], v. 90, n. 4, p.507-511, out. 2001. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/j.2168-9830.2001.tb00632.x>.

JOSHI, Deepti et al. Databased comparison of Sparse Bayesian Learning and Multiple Linear Regression for statistical downscaling of low flow indices. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 488, p.136-149, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.040>.

KANG, Shih-chung et al. Development of Virtual Equipment: Case Study of the Venturi Tube Experiment. **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice**, [s.l.], v. 139, n. 4, p.281-289, out. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ei.1943-5541.0000158](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ei.1943-5541.0000158).

KOZA, John R.; **Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection**. MIT press, 1992.

KEMBER, David. Misconceptions about the learning approaches, motivation and study practices of Asian students. **Higher education**, v. 40, n. 1, p. 99-121, 2000.

- KEMENY, John G.; SNELL, J. Laurie. **Markov Chains**. Springer-Verlag, New York, 1976.
- KERGOURLAY, G. et al. Influence of splitter blades on the flow field of a centrifugal pump: test-analysis comparison. **International Journal of Rotating Machinery**, v. 2007, 2007.
- LI, Shengcai; ZHANG, Youjing; HAMMITT, F. G.. Characteristics of cavitation bubble collapse pulses, associated pressure fluctuations, and flow noise. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.109-122, mar. 1986. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221688609499325>.
- LI, Songheng et al. Validation of a three-dimensional numerical model for water-pump intakes / Validation d'un modèle numérique tridimensionnel pour les aspirateurs de pompes. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 42, n. 3, p.282-292, jan. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2004.9641196>.
- LAMBOT, S. et al. A global multilevel coordinate search procedure for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 38, n. 11, p.6-1, nov. 2002. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2001wr001224>.
- LEUNG, Mei-yung; WANG, Ying; CHAN, David K. K.. Structural Surface-Achieving Model in the Teaching and Learning Process for Construction Engineering Students. **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice**, [s.l.], v. 133, n. 4, p.327-339, out. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1052-3928\(2007\)133:4\(327\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1052-3928(2007)133:4(327)).
- LEUNG, M. Y. et al. Impact of teaching approaches in construction engineering education: a comparative study between Hong Kong and Mainland China. **Journal of Engineering Education**, v. 97, n. 2, p. 135-145, 2008
- LOBANOFF, Val S.; ROSS, Robert R. **Centrifugal pumps: design and application**. Elsevier, 2013.

MESQUITA, André L. Amarante et al. 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, Anais... João Pessoa: Universidade Federal do Pará**, p. 1-15, 2006.

MITCHELL, Melanie. **An introduction to genetic algorithms**. MIT press, 1998.

MOHSENI, Omid; STEFAN, Heinz G.; ERICKSON, Troy R.. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 34, n. 10, p.2685-2692, out. 1998. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/98wr01877>.

MOSTERMAN, Pieter J. et al. Virtual Engineering Laboratories: Design and Experiments. **Journal Of Engineering Education**, [s.l.], v. 83, n. 3, p.279-285, jul. 1994. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/j.2168-9830.1994.tb01116.x>.

MURPHY, Michael D.. A modular virtual laboratory for quadrotor control simulation. **Ifac-papersonline**, [s.l.], v. 49, n. 6, p.93-98, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.159>

NASCIMENTO, Everton Rodrigo Brito et al. CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE BAIXO CUSTO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE BOMBAS EM SÉRIE E BOMBAS EM PARALELO. XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2013.

NEDIC, Zorica; MACHOTKA, Jan; NAFALSKI, Andrew. **Remote laboratories versus virtual and real laboratories**. IEEE, 2003.

NESBITT, Brian. **Handbook of Pumps and Pumping**. [s.i.]: Elsevier Science, 2006. 424 p.

NETTO, Azevedo; Y FERNÁNDEZ, Miguel Fernández. **Manual de hidráulica**. Editora Blucher, 2018.

NEUPAUER, Roseanna M.; DENNIS, Norman D.. Classroom Activities to Illustrate Concepts of Darcy's Law and Hydraulic Conductivity. **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice**, [s.l.], v. 136, n. 1, p.17-23, jan. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1052-3928\(2010\)136:1\(17\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1052-3928(2010)136:1(17))

OLIVEIRA, D. Y. **Análise Bayesiana aplicada à modelagem dos processos de interceptação e chuva-vazão em duas bacias florestais**. 2018. 305p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

PLANELLS, P. et al. Selección de bombas en redes de riego a presión. **Ingeniería del Agua**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.47-57, 31 mar. 2006. Universitat Politecnica de Valencia. <http://dx.doi.org/10.4995/ia.2006.2881>.

POPESCU, Calin. Construction engineering graduate education survey. **Journal of construction engineering and management**, v. 113, n. 4, p. 664-668, 1987.

POSSAMAI, Juliana Zanellato. Estudo comparativo entre diferentes tipos de tubulações nas redes de instalações hidráulicas prediais. **Unesc**, 2013.

RAN, Hongjuan; LUO, Xianwu. Experimental study of instability characteristics in pump turbines. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 56, n. 6, p.871-876, 11 jul. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2017.1422193>.

ROMANOWICZ, Renata; YOUNG, Peter C. Data assimilation and uncertainty analysis of environmental assessment problems—An application of Stochastic Transfer Function and Generalised Likelihood Uncertainty Estimation techniques. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 79, n. 2, p. 161-174, 2003.

SANTOS, Aline Coêlho dos; NICOLETE, Priscila Cadorin; SILVA, Jurarez Bento. Ensino Híbrido: Relato de Experiência sobre o uso de AVEA em uma proposta de Sala de Aula Invertida para o Ensino Médio. **RENOTE**, v. 15, n. 2, 2017.

SHIMA, A. et al. Cavitation damage study with a rotating disk at the high peripheral velocities. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 30, n. 4, p.521-538, jul. 1992. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221689209498898>.

SOARES, Alexandre K.; MARTINS, Nuno M. C.; COVAS, Dídia I. C.. Transient vaporous cavitation in a horizontal copper pipe. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 55, n. 5, p.731-736, 22 fev. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2017.1286394>.

SETIAWAN, Ahmad Agus et al. Development of a Solar Water Pumping System in Karsts Rural Area Tepus, Gunungkidul through Student Community Services. *Energy Procedia*, [s.i.], v. 47, p.7-14, 2014. Elsevier BV.

STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of global optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, 1997.

TEIXEIRA, Guilherme Augusto de Matheucci e Silva. **Desenvolvimento de um modelo numérico para estimar a relação de descarga em função da radiação e altura manométrica em sistemas de bombeamento fotovoltaico**. 2017. 125 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

TEXIUS, 2019. Disponível em [http://www.texius.com.br/site/produtos\\_beta.php?cod\\_produto=936](http://www.texius.com.br/site/produtos_beta.php?cod_produto=936)> Acesso em 28 de novembro de 2019.

TÖRN, Aimo; ŽILINSKAS, Antanas. **Global optimization**. Berlin: Springer, 1989.

TRIGWELL, Keith; PROSSER, Michael; TAYLOR, Philip. Qualitative differences in approaches to teaching first year university science. **Higher education**, v. 27, n. 1, p. 75-84, 1994.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 4. ed. São Paulo: Daikoku, 2013. 643 p.

VOLPI, E. et al. Reservoir Effects on Flood Peak Discharge at the Catchment Scale. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 54, n. 11, p.9623-9636, nov. 2018. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2018wr023866>.

VRUGT, Jasper A. et al. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 44, n. 12, dez. 2008. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2007wr006720>

VRUGT, Jasper A.. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 75, p.273-316, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.013>.

WANG, Wei et al. Nonlinear Filtering Effects of Reservoirs on Flood Frequency Curves at the Regional Scale. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 53, n. 10, p.8277-8292, out. 2017. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2017wr020871>.

WERNER, M.g.f.; LAMBERT, M.f.. Comparison of modelling approaches used in practical flood extent modelling. **Journal Of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.202-215, mar. 2007. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2007.10525036>.

YARBROUGH, Stephanie E.; GILBERT, Robert B.. Development, Implementation, and Preliminary Assessment of Virtual Laboratory. **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practice**, [s.l.], v. 125, n. 4, p.147-151, out. 1999. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1052-3928\(1999\)125:4\(147\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1052-3928(1999)125:4(147)).

ZHU, Qing et al. Integrating real-time and manual monitored data to predict hillslope soil moisture dynamics with high spatio-temporal resolution using linear and non-linear models.

**Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 545, p.1-11, fev. 2017. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.014>.

### APÊNDICE A – Dados coletados para a bomba individual 1

Conta-se, na Planilha 1, as medições de pressão e de potência realizadas para a bomba 1 funcionando de forma individual no sistema.

Planilha 1 – dados coletados de pressão e de potência referentes à bomba individual 1.

Q (L/min)	p <sub>V<sub>B</sub>3</sub> (mmHg)	p <sub>V<sub>B</sub>1</sub> (mmhg)	p <sub>M<sub>B</sub>1</sub> (mca)	P <sub>D<sub>B</sub>1</sub> (W)
20	0,0	-25,0	16,8	420
25	0,0	-27,5	16,5	430
30	0,0	-30,0	15,8	440
35	0,0	-37,5	15,3	460
40	0,0	-42,5	14,8	470
45	0,0	-50,0	14,5	480
50	0,0	-55,0	14,0	490
55	0,0	-67,5	13,5	500
60	0,0	-77,5	13,0	520
65	-22,5	-82,5	12,5	530
70	-25,0	-92,5	12,3	540
75	-27,5	-102,5	11,3	560
80	-32,5	-112,5	11,0	570
85	-37,5	-127,5	10,5	580
90	-42,5	-140,0	10,0	600
95	-47,5	-152,5	9,5	610
100	-52,5	-167,5	8,8	620
105	-57,5	-185,0	8,0	640
110	-62,5	-202,5	7,3	650
115	-67,5	-227,5	6,3	660
120	-72,5	-257,5	5,8	680
125	-77,5	-270,0	5,0	690

Fonte: autoria própria.

### APÊNDICE B – Dados coletados para a bomba individual 2

Conta-se, na Planilha 2, as medições de pressão e de potência realizadas para a bomba 2 funcionando de forma individual no sistema.

Planilha 2 – dados coletados de pressão e de potência referentes à bomba individual 2.

<b>Q (L/min)</b>	<b>p<sub>V</sub>B2 (mmhg)</b>	<b>p<sub>M</sub>B2 (mca)</b>	<b>P<sub>D</sub>B2 (W)</b>	<b>Q (L/min)</b>
20	-50,0	16,0	475	20
25	-55,0	15,5	481	25
30	-60,0	15,0	500	30
35	-67,5	14,5	510	35
40	-75,0	14,0	522	40
45	-82,5	13,5	540	45
50	-92,5	13,0	550	50
55	-102,5	12,5	560	55
60	-112,5	12,0	580	60
65	-125,0	11,5	600	65
70	-137,5	11,0	610	70
75	-152,5	10,3	630	75
80	-162,5	9,8	650	80
85	-175,0	9,3	660	85
90	-192,5	8,5	680	90
95	-207,5	7,8	700	95
100	-227,5	7,0	720	100
105	-242,5	6,3	730	105
110	-260,0	5,5	740	110
115	-280,0	4,5	760	115
120	-292,5	4,0	770	120

**Fonte: autoria própria.**

### APÊNDICE C – Dados coletados para a associação em série

Conta-se, na Planilha 3, as medições de pressão realizadas para a associação em série, com a bomba 1 a montante e a bomba 2 a jusante.

Planilha 3 – dados coletados de pressão referentes à associação em série BC1 – BC2.

Q (L/min)	p <sub>V</sub> B1 (mmhg)	p <sub>M</sub> B1 (mca)	p <sub>V</sub> B2 (mmhg)	p <sub>M</sub> B2 (mca)
20	-27,5	17,0	0,0	33,0
25	-32,5	16,3	0,0	32,0
30	-37,5	15,8	0,0	30,8
35	-42,5	15,3	0,0	30,0
40	-47,5	14,8	0,0	28,8
45	-55,0	14,3	0,0	28,0
50	-62,5	14,0	0,0	27,0
55	-72,5	13,8	0,0	26,0
60	-80,0	13,3	0,0	25,0
65	-90,0	12,8	0,0	24,0
70	-102,5	12,3	0,0	23,0
75	-112,5	11,8	0,0	21,8
80	-122,5	11,0	0,0	20,8
85	-145,0	10,5	0,0	19,5
90	-150,0	10,0	0,0	18,3
95	-162,5	9,3	0,0	16,8
100	-177,5	8,8	0,0	15,3
105	-192,5	7,8	0,0	13,8
110	-205,0	7,3	0,0	12,3
115	-232,5	6,5	0,0	10,8
120	-250,0	5,8	0,0	9,0
125	-272,5	4,8	0,0	7,3

Fonte: autoria própria.

### APÊNDICE D – Dados coletados para a associação em paralelo

Conta-se, na Planilha 4, as medições de pressão realizadas para a associação em paralelo.

Planilha 4 – dados coletados de pressão referentes à associação em paralelo.

Q (L/min)	p <sub>VBI</sub> (mmhg)	p <sub>MB1</sub> (mca)	p <sub>VBI</sub> (mmhg)	p <sub>MB2</sub> (mca)
20	-27,5	17,5	-45,0	16,8
25	-30,0	17,3	-47,5	16,5
30	-32,5	17,0	-52,5	16,3
35	-35,0	16,8	-55,0	16,0
40	-37,5	16,5	-57,5	15,8
45	-40,0	16,3	-60,0	15,5
50	-42,5	16,0	-62,5	15,3
55	-45,0	15,8	-67,5	15,0
60	-47,5	15,5	-70,0	14,8
65	-52,5	15,3	-75,0	14,5
70	-57,5	15,0	-82,5	14,3
75	-62,5	14,8	-87,5	14,0
80	-67,5	14,5	-92,5	13,8
85	-72,5	14,3	-100,0	13,5
90	-80,0	14,0	-107,5	13,3
95	-87,5	13,8	-115,0	13,0
100	-92,5	13,5	-120,0	12,8
105	-100,0	13,3	-127,5	12,5
110	-105,0	13,0	-135,0	12,3
115	-112,5	12,5	-142,5	12,0
120	-120,0	12,3	-150,0	11,8
125	-127,5	12,0	-160,0	11,3

Fonte: autoria própria.

## APÊNDICE E – Desempenho na atividade avaliativa do experimento de bombeamento

Conta-se, na Planilha 5, as notas obtidas pelos estudantes das turmas de Hidráulica e Hidráulica, no semestre 2019.2 da UFSC, referente ao experimento de bombeamento. Consta-se também os grupos e subgrupos referente ao uso ou não do laboratório virtual.

Planilha 5 – dados coletados das notas dos estudantes do experimento de bombeamento.

<b>Aluno</b>	<b>Nota</b>	<b>Turma</b>	<b>Grupo</b>	<b>Subgrupo</b>
1	8,00	ENS7008	A	A2
2	9,50	ENS7008	A	A2
3	9,50	ENS7008	A	A1
4	8,50	ENS7008	A	A2
5	9,50	ENS7008	A	A1
6	9,50	ENS7008	A	A2
7	10,00	ENS7008	A	A1
8	9,50	ENS7008	A	A2
9	5,75	ENS5101	A	A1
10	4,50	ENS5101	B	B
11	7,00	ENS5101	A	A2
12	7,00	ENS5101	B	B
13	7,00	ENS5101	B	B
14	7,00	ENS5101	B	B
15	8,00	ENS5101	A	A3
16	7,50	ENS5101	A	A3
17	8,50	ENS5101	B	B
18	6,50	ENS5101	A	A2
19	6,50	ENS5101	B	B
20	6,50	ENS5101	B	B
21	7,75	ENS5101	A	A1
22	5,50	ENS5101	B	B
23	6,50	ENS5101	A	A2
24	8,50	ENS5101	A	A1
25	8,50	ENS5101	B	B
26	7,00	ENS5101	B	B
27	8,50	ENS5101	A	A3
28	8,50	ENS5101	B	B
29	8,00	ENS5101	A	A3
30	7,00	ENS5101	A	A1
31	8,50	ENS5101	B	B
32	7,50	ENS5101	A	A3

<b>Aluno</b>	<b>Nota</b>	<b>Turma</b>	<b>Grupo</b>	<b>Subgrupo</b>
33	7,50	ENS5101	A	A3
34	8,50	ENS5101	A	A3
35	5,25	ENS5101	B	B
36	6,50	ENS5101	A	A3
37	8,50	ENS5101	A	A1
38	7,00	ENS5101	B	B
39	7,00	ENS5101	B	B
40	4,25	ENS5101	A	A1

**Fonte: autoria própria.**

## APÊNDICE F – Desempenho na atividade avaliativa do experimento de perda de carga

Conta-se, na Planilha 6, as notas obtidas pelos estudantes das turmas de Hidráulica e Hidráulica, no semestre 2019.2 da UFSC, referente ao experimento de perda de carga. Consta-se também qual turma o aluno esteve inscrito.

Planilha 6 – dados coletados das notas dos estudantes do experimento de perda de carga.

<b>Aluno</b>	<b>Nota</b>	<b>Turma</b>
1	8,00	ENS7008
2	9,50	ENS7008
3	9,50	ENS7008
4	8,50	ENS7008
5	9,50	ENS7008
6	9,50	ENS7008
7	10,00	ENS7008
8	9,50	ENS7008
9	5,75	ENS5101
10	6,00	ENS5101
11	7,50	ENS5101
12	7,50	ENS5101
13	7,50	ENS5101
14	10,00	ENS5101
15	10,00	ENS5101
16	7,50	ENS5101
17	8,50	ENS5101
18	8,50	ENS5101
19	8,50	ENS5101
20	8,50	ENS5101
21	8,50	ENS5101
22	8,50	ENS5101
23	8,50	ENS5101
24	7,50	ENS5101
25	5,50	ENS5101
26	9,00	ENS5101
27	8,50	ENS5101
28	7,50	ENS5101
29	7,00	ENS5101
30	8,00	ENS5101
31	10,00	ENS5101
32	9,00	ENS5101
33	8,50	ENS5101
34	8,50	ENS5101
35	9,00	ENS5101

<b>Aluno</b>	<b>Nota</b>	<b>Turma</b>
36	9,00	ENS5101
37	8,50	ENS5101
38	9,00	ENS5101
39	9,50	ENS5101
40	8,50	ENS5101

**Fonte: autoria própria.**

### APÊNDICE G – Questionário de aceitação referente ao experimento real

Conta-se, na Planilha 7, as perguntas realizadas aos estudantes das turmas de Hidráulica e Hidráulica, no semestre 2019.2 da UFSC, referente ao experimento real.

Planilha 7 – questionário opinativo aplicado aos estudantes acerca do experimento real.

Assunto	AVALIE A CONTRIBUIÇÃO DE DETERMINADO ASSUNTO PROMOVIDA PELO <u>EXPERIMENTO REAL</u>			
	AJUDOU MUITO	AJUDOU POUCO	NÃO AJUDOU	DEIXOU MAIS CONFUSO
Construção das curvas características				
Entendimento dos fatores que reduzem as pressões do escoamento				
Verificação da influência das associações de bombas no escoamento				
Entendimento do processo de cavitação				
Compreensão dos fatores que influenciam na cavitação				
Maior visualização prática dos conceitos de Hidráulica				

Fonte: autoria própria.

## APÊNDICE H – Questionário de aceitação referente ao laboratório virtual

Conta-se, na Planilha 8, as perguntas realizadas aos estudantes das turmas de Hidráulica e Hidráulica, no semestre 2019.2 da UFSC, referente ao laboratório virtual.

Planilha 8 – questionário opinativo aplicado aos estudantes acerca do laboratório virtual.

Assunto	<b>AVALIE A CONTRIBUIÇÃO DE DETERMINADO ASSUNTO PROMOVIDA PELO <u>LABORATÓRIO VIRTUAL</u></b>			
	<b>AJUDOU MUITO</b>	<b>AJUDOU POUCO</b>	<b>NÃO AJUDOU</b>	<b>DEIXOU MAIS CONFUSO</b>
Construção das curvas características				
Entendimento dos fatores que reduzem as pressões do escoamento				
Verificação da influência das associações de bombas no escoamento				
Entendimento do processo de cavitação				
Compreensão dos fatores que influenciam na cavitação				
Maior visualização prática dos conceitos de Hidráulica				

**Fonte: autoria própria.**

## APÊNDICE I – Respostas ao questionário do experimento real

Conta-se, na Planilha 9, a quantidade de respostas para cada aluno referente à opinião do mesmo acerca do experimento real. Consta-se também os grupos e subgrupos de cada um dos alunos.

Planilha 9 – quantidade de respostas dos alunos referente ao questionário do experimento real.

Aluno	Grupo	Subgrupo	Ajudou Muito	Ajudou Pouco	Não Ajudou	Deixou mais confuso	Pontuação total
1	A	A2	2	3	1	0	7
2	A	A1	6	0	0	0	12
3	A	A1	6	0	0	0	12
4	A	A2	2	2	2	0	6
5	A	A2	1	5	0	0	7
6	A	A1	2	3	1	0	7
7	A	A2	2	3	1	0	7
8	A	A2	4	2	0	0	10
9	A	A1	5	1	0	0	11
10	A	A3	x	x	x	x	x
11	B	B	2	3	1	0	7
12	B	B	3	3	0	0	9
13	B	B	3	3	0	0	9
14	B	B	4	2	0	0	10
15	B	B	3	3	0	0	9
16	B	B	4	2	0	0	10
17	B	B	4	2	0	0	10
18	A	A2	0	3	3	0	3
19	A	A3	3	3	0	0	9
20	A	A1	3	2	1	0	8
21	B	B	4	2	0	0	10
22	A	A1	2	3	1	0	7
23	A	A3	0	4	2	0	4
24	B	B	3	3	0	0	9
25	B	B	1	2	3	0	4
26	B	B	3	3	0	0	9
27	B	B	3	3	0	0	9
28	A	A2	4	2	0	0	10
29	B	B	5	1	0	0	11
30	A	A2	6	0	0	0	12
31	A	A1	1	2	3	0	4
32	B	B	4	2	0	0	10
33	B	B	4	2	0	0	10

Fonte: autoria própria.



## APÊNDICE J – Respostas ao questionário do laboratório virtual

Conta-se, na Planilha 10, a quantidade de respostas para cada aluno referente à opinião do mesmo acerca do experimento real. Consta-se também os grupos e subgrupos de cada um dos alunos.

Planilha 10 – quantidade de respostas dos alunos ao questionário do laboratório virtual.

Aluno	Grupo	Subgrupo	Ajudou Muito	Ajudou Pouco	Não Ajudou	Deixou mais confuso	Pontuação total
1	A	A2	5	1	0	0	11
2	A	A1	6	0	0	0	12
3	A	A1	6	0	0	0	12
4	A	A2	5	1	0	0	11
5	A	A2	6	0	0	0	12
6	A	A1	6	0	0	0	12
7	A	A2	5	1	0	0	11
8	A	A2	6	0	0	0	12
9	A	A1	6	0	0	0	12
10	A	A3	3	3	0	0	9
11	B	B	x	x	x	x	x
12	B	B	x	x	x	x	x
13	B	B	x	x	x	x	x
14	B	B	x	x	x	x	x
15	B	B	x	x	x	x	x
16	B	B	x	x	x	x	x
17	B	B	x	x	x	x	x
18	A	A2	4	1	1	0	9
19	A	A3	5	1	0	0	11
20	A	A1	5	1	0	0	11
21	B	B	x	x	x	x	x
22	A	A1	4	1	1	0	9
23	A	A3	3	3	0	0	9
24	B	B	x	x	x	x	x
25	B	B	x	x	x	x	x
26	B	B	x	x	x	x	x
27	B	B	x	x	x	x	x
28	A	A2	6	0	0	0	12
29	B	B	x	x	x	x	x
30	A	A2	4	2	0	0	10
31	A	A1	3	3	0	0	9
32	B	B	x	x	x	x	x
33	B	B	x	x	x	x	x

Fonte: autoria própria.

## **ANEXO A – Especificações das bombas utilizadas no experimento real**

O modelo e as características das bombas utilizadas no experimento encontram-se a seguir (TEXIUS, 2019):

- **Marca:** Texius;
- **Modelo:** TBHWS – RN;
- **Potência:** ½ CV;
- **Tensão:** 110 V ou 220 V;
- **Frequência:** 60 Hz;
- **Temperatura da água:** 5°C a 40°C;
- **Temperatura ambiente (local da instalação):** 0°C a 40°C;
- **Pressão máxima na sucção:** 40 mca;
- **Conexões:** Suc. e Rec. 1’’ BSP;
- **Peso:** 6,5 kg.