

**JULIANA PAES DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO MATEMÁTICA E EXPERIMENTAL DE DUAS CONFIGURAÇÕES  
PARA ENCHIMENTO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**2019**

**JULIANA PAES DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO MATEMÁTICA E EXPERIMENTAL DE DUAS CONFIGURAÇÕES  
PARA ENCHIMENTO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA**

**Trabalho de conclusão de curso** apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de BACHAREL em **ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Máquinas de fluxo e sistemas hidráulicos

Orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges

**UBERLÂNDIA - MG**

**2019**

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram nas horas mais difíceis e nunca deixaram faltar suporte e amor em minha vida. Não estaria onde estou sem vocês.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à todas as pessoas que estiveram ao meu lado, não somente durante a realização deste trabalho, mas durante toda minha jornada na graduação. Agradeço, especialmente, à minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas decisões e me amparou quando eu precisava. Agradeço, acima de tudo, aos meus pais, Maribeth e Eronildes, e minha irmã, Gabriela, que me acompanharam durante todo meu trajeto na faculdade sempre com muito amor e carinho. Também agradeço aos meus cachorros, Zeca e Frida, e aos meus gatos, Oliver e Zelda, pelo eterno companheirismo em todas as noites não dormidas durante esses anos. Além disso, quero agradecer à todos os meus amigos; aos que ainda estão em minha vida e aos que, por algum motivo, não estão mais. Todos eles foram essenciais para o meu crescimento pessoal e me ajudaram a me tornar quem eu sou hoje.

Por fim, gostaria de agradecer a todo o time do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia, por providenciar o ambiente e os recursos necessários para a realização da minha pesquisa. Em especial, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Valério Luiz Borges, por me dar a oportunidade de realizar este trabalho e me auxiliar ao longo de todo o processo. Também agradeço ao meu amigo e companheiro de curso Jean Carlos Pimenta Almeida, cujo projeto cito algumas vezes neste trabalho, por ter me acompanhado não só no desenvolvimento desta pesquisa, mas em minha graduação inteira.

À todos que me apoiaram até aqui, meu muito obrigada!

SANTOS, J.P. **Comparação matemática e experimental de duas configurações para enchimento de reservatórios de água.** 2019. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

## RESUMO

Tanques de armazenamento de água são um recurso amplamente utilizado em uma grande quantidade de processos, praticamente em todos os segmentos da indústria. Dessa forma, a otimização do enchimento de reservatórios, especialmente a redução do tempo necessário para abastecer um tanque, é de grande importância na redução de custos de uma dada aplicação. Atualmente, é muito comum encontrar reservatórios que são enchidos por cima, pois já é difundido no senso comum que essa configuração é mais rápida. Porém, se analisarmos as equações matemáticas envolvidas nesse processo, veremos que isso não é verdade, e que, especialmente em aplicações com grande quantidade de acessórios e tubulações extensas, o enchimento por baixo oferece uma vantagem de tempo. No presente trabalho, foi realizada a modelagem matemática e a validação experimental desse comportamento, a partir do equacionamento do problema no software Engineering Equation Solver (EES) e da construção de uma bancada de testes.

**Palavras-chave:** reservatório de água, tempo de enchimento, sistemas hidráulicos, bombeamento

SANTOS, J.P. **Mathematical and experimental comparison of two configurations for water reservoirs filling** 2019. Graduation Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

### **ABSTRACT**

Water storage tanks are a feature widely used in a large number of processes in virtually every industry segment. Thus, optimizing reservoir filling, especially reducing the time required to fill a tank, is of great importance in reducing the cost of a given application. It is very common nowadays to find reservoirs that are filled from the top, as it is already common sense that this setting is faster. However, if we look at the mathematical equations involved in this process, we see that this is not true, and that, especially in applications with a large amount of fittings and extensive piping, filling from the bottom of the tank offers a time advantage. In the present work, the mathematical modeling and experimental validation of this behaviour were made, based on the equations involved in the problem with the aid of Engineering Equation Solver (EES) software and the construction of a test bench.

**Keywords:** water reservoir, filling time, hydraulic systems, pumping

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Tempo de enchimento real e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta.....	29
Tabela 4.2 - Vazão real e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta.....	29
Tabela 4.3 - Tempo de enchimento simulado e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta.....	30
Tabela 4.4 - Vazão simulada e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta.....	30
Tabela 4.5 - comparação entre o tempo real e o simulado das duas configurações para a válvula 75% aberta.....	33
Tabela 4.6 - comparação entre o tempo real e o simulado das duas configurações para a válvula 50% aberta.....	33
Tabela 4.7 - Comparação entre real e simulado das vazões para a válvula 75% aberta [m <sup>3</sup> /h].....	33
Tabela 4.8 - Comparação entre real e simulado das vazões para a válvula 50% aberta [m <sup>3</sup> /h].....	33
Tabela 4.9 - Diferença de tempo entre as duas configurações em um sistema simulado com a válvula 75% aberta.....	35
Tabela 4.10 - Diferença de vazão entre as duas configurações em um sistema simulado com a válvula 75% aberta.....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo de água nas indústrias (Barth, 1987).....	13
Figura 2.2 - Balanço energético entre 0 e 1 em uma veia líquida de escoamento (Macintyre, 1997).....	15
Figura 2.3 - Comparativo entre diferentes porcentagens de fechamento de uma válvula gaveta (Sotomayor, 2016).....	16
Figura 2.4 - Válvula de globo (Telles, 2010).....	19
Figura 2.5 - Plotagem de perfis de pressão e velocidade em uma válvula globo 50% fechada (Sotomayor, 2016).....	19
Figura 3.6 - Curva Q x H da bomba Intech Machine BP 500, de acordo com o manual do fabricante.....	22
Figura 3.7 - Configuração da bancada experimental.....	24
Figura 3.8 - Parte superior da bancada experimental.....	25
Figura 3.9 - Detalhe da configuração da bancada.....	26
Figura 3.10 - Onda quadrada característica do medidor de fluxo e a frequência da mesma no display do osciloscópio.....	27
Figura 4.11 - Vazão [m <sup>3</sup> /h] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta.....	31
Figura 4.12 - Volume[m <sup>3</sup> ] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta.....	31
Figura 4.13 - Vazão [m <sup>3</sup> /h] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 50% aberta.....	32
Figura 4.14 - Volume[m <sup>3</sup> ] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 50% aberta.....	32
Figura 4.15 - Vazão [m <sup>3</sup> /h] em função do tempo [min] da simulação no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta.....	36
Figura 4.16 - Volume [m <sup>3</sup> ] em função do tempo [min] da simulação no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta.....	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Arábicos

$H_{head}$	Altura manométrica da bomba
$H_{perdas}$	Perdas de carga no sistema
$K_v$	Coefficiente de perda de carga
$L_e$	Comprimento equivalente de acessórios
$P_{head}$	Pressão na saída da bomba
$Q_i$	Vazão no instante $i$
$t_i$	Tempo no instante $i$
$A$	Área da base do reservatório
$F$	Frequência
$H$	Altura do fluido
$H1$	Altura de sucção
$H2$	Altura até o fundo do reservatório
$H3$	Altura até o topo do reservatório
$L$	Comprimento de tubulação
$L1$	Comprimento total de tubulação até o fundo do reservatório
$L2$	Comprimento total de tubulação até o topo do reservatório
$P$	Pressão
$Q$	Vazão
$a$	Coefficiente angular da curva da bomba
$b$	Coefficiente linear da reta
$d$	Diâmetro da tubulação
$e$	Rugosidade relativa
$f$	Fator de atrito
$g$	Gravidade
$\nu$	Viscosidade cinemática
$t$	Tempo
$\rho$	Densidade do fluido

## Siglas

<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas
<b>Chiller</b>	Sistema de refrigeração por resfriamento de fluido secundário
<b>EES</b>	Engineering Equation Solver
<b>Embrapa</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>FAO</b>	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
<b>HP</b>	Horsepower
<b>HVACR</b>	Setor de aquecimento, ventilação, ar condicionado e refrigeração
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
<b>LTCM</b>	Laboratório de Transferência de Calor e Massa
<b>MW</b>	Mega watts
<b>PVC</b>	Policloreto de polivinila

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	4
RESUMO .....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE TABELAS .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE SÍMBOLOS .....	9
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
5. CONCLUSÃO .....	38
5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	38
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

## 1. INTRODUÇÃO

A água é fundamental em inúmeros processos na maioria das indústrias e na agricultura, desde seu uso para irrigação até sua utilização em sistemas de arrefecimento. Dessa forma, a otimização do armazenamento desse recurso em reservatórios é fundamental para economizar gastos, uma vez que o tempo é um fator crucial em qualquer processo e, usualmente, as bombas em sistemas hidráulicos tem um alto consumo de energia por hora. Assim, surge a necessidade de diminuir o tempo de enchimento dos tanques de água, para que o processo em questão se torne mais eficiente e menos custoso.

Atualmente, tem-se como senso comum que o enchimento de um reservatório de água por cima é mais rápido do que o enchimento por baixo, o que não é verdade. Em aplicações de pequena escala, como residências e comércios, a diferença entre as duas configurações é irrisória, e pode não apresentar um ganho significativo de tempo. Porém, em instalações com grande quantidade de acessórios e tubulações extensas, essa diferença cresce, tornando a escolha da configuração de enchimento correta extremamente relevante para o processo.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), apenas 8% do consumo de água é destinado ao uso doméstico, enquanto 22% vai para a indústria e 70% para agricultura. Isso mostra uma predominância da utilização de sistemas hidráulicos em aplicações de maior escala, com reservatórios de grande volume e alta influência de fatores como tempo de trabalho da bomba e tempo de enchimento do tanque.

Consumo de Água nas Indústrias	
Tipo de Indústria	Consumo
Laminação de aço	85 m <sup>3</sup> por t de aço
Refinação de petróleo	290 m <sup>3</sup> por barril refinado
Indústria têxtil	1.000 m <sup>3</sup> por t de tecido
Couros (curtumes)	55 m <sup>3</sup> por t de couro
Papel	250 m <sup>3</sup> por t de papel
Saboarias	2 m <sup>3</sup> por t de sabão
Usinas de açúcar	75 m <sup>3</sup> por t de açúcar
Fábrica de conservas	20 m <sup>3</sup> por t de conserva
Laticínios	2 m <sup>3</sup> por t de produto
Cervejaria	20 m <sup>3</sup> por m <sup>3</sup> de cerveja
Lavanderia	10 m <sup>3</sup> por t de roupa
Matadouros	3 m <sup>3</sup> por animal abatido

Figura 1.1 - Consumo de água nas indústrias (Barth, 1987)

Segundo dados da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), são gastos 10 milhões de litros por hectare por ano em uma lavoura irrigada. Um estudo divulgado pela ANA (Agência Nacional de Águas) em 2017 mostra que o Brasil tem cerca de 6,95 milhões de hectares plantados que utilizam técnicas de irrigação, o que resulta em 69,5 bilhões de litros de água sendo utilizados a cada ano apenas na agricultura. Isso representa uma inúmera quantidade de reservatórios de água, além de bombas, tubulação e acessórios.

O setor energético, especialmente as usinas termelétricas, também são um dos grandes consumidores de água do Brasil. Devido à necessidade de produção de vapor, além da utilização da água nos trocadores de calor, as usinas termelétricas tem um alto consumo de água. Segundo um estudo divulgado em 2017 pelo coletivo Nigéria, as duas usinas do grupo MPX na região do Castanhão (Ceará), planejadas para gerar 1.085 MW, podem consumir até 5 mil litros por segundo de água bruta (água doce não tratada). Isso representa 157,68 bilhões de litros de água por ano, e um gasto elevado de energia elétrica para bombear o líquido dentro do sistema e para os reservatórios.

Além das indústrias citadas anteriormente, também temos a utilização de tanques de água em inúmeras aplicações, como por exemplo: *chillers* e *pré-chillers* para tratamento de carcaças de frango na indústria frigorífica, caixas d'água do sistema de água e esgoto de municípios, sistemas de abastecimento de prédios e complexos comerciais e outros.

O objetivo do presente trabalho é provar, matematicamente e experimentalmente, que o enchimento de um tanque de água por baixo é mais rápido e efetivo do que o enchimento por cima, com a finalidade de otimizar processos e gerar uma economia de tempo e dinheiro em grandes sistemas hidráulicos.

Parte do equacionamento matemático e do programa do software EES (Engineering Equation Solver) foi baseado nas notas de aula do Prof. Dr. Valério Luiz Borges, da Faculdade Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Esse material foi ministrado e disponibilizado durante o lecionamento da disciplina Máquinas de Fluxo e Sistemas Hidráulicos, no 6º período do curso de Engenharia Mecânica.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desempenho de uma bomba centrífuga ou periférica pode ser descrito a partir de uma equação característica, que relaciona a altura manométrica com a vazão de líquido. Normalmente, as curvas características nos catálogos técnicos abrangem apenas parte dos parâmetros de operação da bomba, e são concebidos de acordo com a ISO 9906 Anexo A, que especifica as tolerâncias das curvas.

Uma das curvas mais importantes, a curva Q x H, mostra a altura que a bomba é capaz de atingir com um determinado caudal. Com os pontos fornecidos no manual da bomba, podemos fazer uma regressão linear e encontrar as constantes da equação, que serão usadas para extrapolar os valores fornecidos pelo fabricante. Assim, para uma bomba periférica de característica linear, podemos escrever:

$$H_{head} = a * Q + b [1]$$

Porém, também devemos levar em conta que existem perdas de pressão em qualquer sistema hidráulico, devido ao atrito do líquido com a tubulação e pela presença de válvulas e acessórios. Segundo Macintyre (1997), “a grandeza H, quando representa energia cedida pelo líquido em escoamento, chama-se *perda de carga* ou *energia perdida* (...) essa energia por unidade de peso de líquido, em última análise, se dissipa sob a forma de calor”.

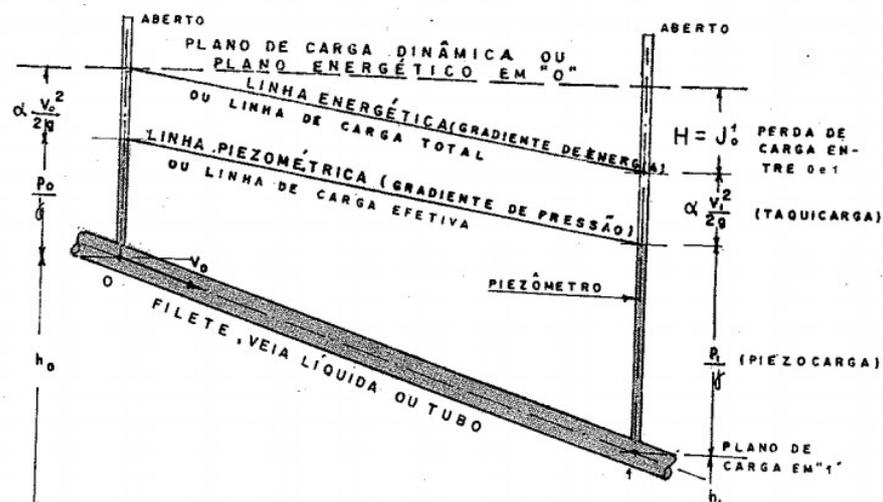


Figura 2.2 - Balanço energético entre 0 e 1 em uma veia líquida de escoamento (Macintyre, 1997)

Podemos medir a perda de carga a partir do desnível piezométrico entre os pontos nos quais se deseja conhecer a perda. Na literatura, encontramos a seguinte equação para a perda de carga em um sistema:

$$H_{perdas} = \left( \frac{8}{\pi^2 * g * d^4} \right) * \left( f * \frac{L + \sum L_e}{d} + \sum K_v \right) * Q^2 [2]$$

O fator de atrito  $f$  pode ser encontrado iterativamente a partir da equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left[ \frac{e}{3,7 * d} + \frac{2,51}{4 * Q * \sqrt{f}} \right] [3]$$

A rugosidade relativa  $e$  é altura média das saliências da rugosidade de uma superfície dividida pelo diâmetro interno do encanamento, enquanto  $ni$  é a viscosidade cinemática do fluido. Para fins de cálculo, adotaremos  $e = 6 * 10^{-5}$  e  $ni = 1,022 * 10^{-6}$  para a tubulação de PVC com diâmetro de ½ polegada utilizada na bancada experimental.

Na equação [2], é importante ressaltarmos dois fatores:  $K_v$  e  $L_e$ .  $K_v$  traduz a vazão que passa por um dado componente com uma perda de carga de 1 bar, e, portanto, é um coeficiente característico de cada válvula. A partir do  $K_v$ , podemos extrapolar a perda de carga em uma dada vazão a partir da seguinte fórmula:

$$Q = K_v * \sqrt{\Delta P} [4]$$

Ou seja, esse coeficiente depende da vazão de fluido e da diferença de pressão do sistema antes e depois da válvula. Essa variável será de grande importância no estudo do problema proposto por esse trabalho, por apresentar qual a resistência imposta pela válvula globo da bancada experimental. Assim, será possível forçar uma perda de carga no sistema de acordo com a porcentagem de acionamento da válvula, para amplificarmos a diferença de tempo entre ambas configurações propostas.



Figura 2.3 - Comparativo entre diferentes porcentagens de fechamento de uma válvula gaveta (Sotomayor, 2016)

Por outro lado,  $L_e$  representa o comprimento equivalente dos acessórios, ou seja, o comprimento de tubo que apresentaria a perda de carga igual ao do acessório em questão. Essas peças também são responsáveis pela perda de energia por causarem turbulência e choque de partículas, alterarem a velocidade do fluido e mudarem a direção do fluxo. Essa informação pode ser encontrada em uma variedade de catálogos, de acordo com o diâmetro e o material da tubulação. Neste trabalho, foram usados os dados fornecidos no livro “Bombas e instalações de bombeamento” (Macintyre, 1997).

Para conseguirmos comparar a diferença do tempo de enchimento entre as duas configurações propostas no trabalho, precisamos relacionar a altura de água no reservatório no tempo com a vazão. A pressão hidrostática no fundo de um reservatório pode ser escritas de duas maneiras:

$$P = \rho * g * h \quad [5]$$

$$P = P_{head} - P_{perdas} \quad [6]$$

Se igualarmos as duas equações, temos:

$$\rho * g * h = P_{head} - P_{perdas} \quad [7]$$

Diferenciando os dois lados da equação em relação ao tempo, temos:

$$\frac{\Delta(P_{head} - P_{perdas})}{\Delta t} = \frac{\rho * g * h}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta(P_{head} - P_{perdas})}{\Delta t} = \rho * g * V_{nível}$$

$$\frac{\Delta(P_{head} - P_{perdas})}{\Delta t} = \rho * g * \frac{Q}{A}$$

Se dividirmos ambos os lados da equação por  $\rho * g$ , teremos:

$$\frac{\Delta(H_{head} - H_{perdas})}{\Delta t} = \frac{Q}{A} \quad [8]$$

Dessa forma, temos uma equação que relaciona a variação de altura do reservatório no tempo com a vazão de líquido.

Experimentalmente, foi elaborada uma bancada de testes no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) na UFU. Devido aos custos dos equipamentos e do espaço disponível, foi construído um modelo de pequena escala, com tubulação PVC, com capacidade de 50 litros e altura total de aproximadamente 2,6 metros. O diâmetro do reservatório foi de 250 milímetros, enquanto o da tubulação foi de  $\frac{1}{2}$  de polegada, ou 17 milímetros.

A escolha pelo menor diâmetro comercial da tubulação foi feita para aumentar a perda de carga no sistema, já que um diâmetro menor oferece mais resistência à passagem de água e requer uma pressão maior da bomba. Para aumentar ainda mais a perda de carga no sistema e evidenciar a diferença de tempo entre as duas configurações, foi colocada uma válvula tipo globo na tubulação, utilizada com 4 porcentagens de abertura diferentes.

Além de oferecer uma resistência à passagem de fluido de acordo com o  $K_v$ , como citado anteriormente, a presença de um registro abaixa a descarga da bomba. Isso faz com que a sobra de energia se perca por turbulências no registro e dentro da própria bomba, causando um gasto inútil de energia (Macintyre, 1997). Portanto, um registro parcialmente fechado abaixa a descarga mas aumenta a altura manométrica da bomba, por deslocar seu ponto de funcionamento.

Segundo Telles (2010), “as válvulas são dispositivos destinados a estabelecer, controlar, e interromper o fluxo em uma tubulação”. Telles também classifica os tipos mais importantes de válvulas como: válvulas de bloqueio, válvulas que permitem o fluxo em um só sentido, válvulas que controlam a pressão de montante, válvulas que controlam a pressão de jusante e válvulas de regulagem (que inclui as válvulas globo).

As válvulas globo possuem fechamento feito por meio de um obturador que se ajusta contra uma única sede, cujo orifício normalmente se encontra paralelo ao fluxo. Esse tipo de registro é considerado uma válvula de regulagem pois é possível correlacionar a porcentagem de abertura da válvula com a porcentagem de vazão, em qualquer posição de abertura parcial. Além disso, causam fortes perdas de carga mesmo quando completamente abertas, equivalentes de 300 a 400 diâmetros do tubo (Telles, 2010).

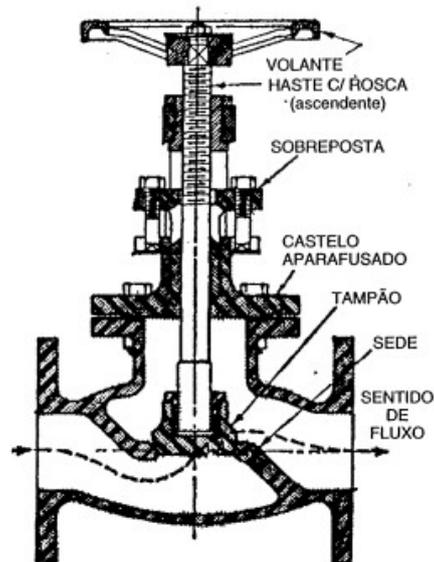


Figura 2.4 - Válvula globo (Telles, 2010)

A válvula globo apresenta uma grande diferença de pressão na passagem do fluido pelo orifício que separa as duas câmaras, próxima ao obturador. Grande parte da perda de carga ocorre quando a válvula está mais que 50% fechada, mas ainda há perda significativa quando a válvula se encontra completamente aberta (Sotomayor, 2016). Existe grande recirculação de fluido nas câmaras da válvula, e menor indícios de cavitação.

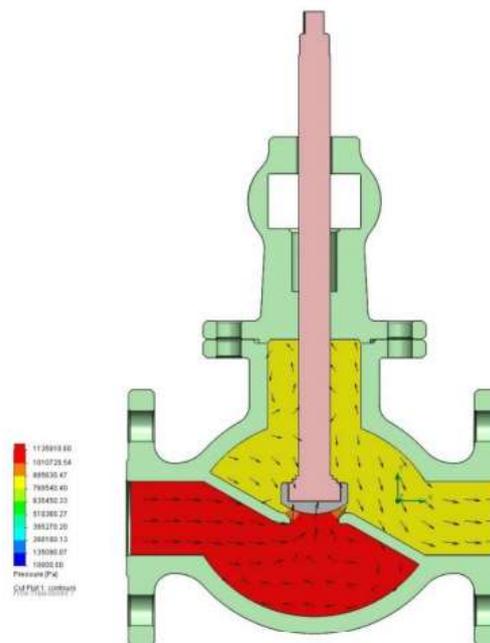


Figura 2.5 - Plotagem de perfis de pressão e velocidade em uma válvula globo 50% fechada (Sotomayor, 2016)

Por fim, também foram utilizados outros instrumentos para a aquisição de dados da bancada: dois manômetros Valfluid com range de 1 a 4 kgf/cm<sup>2</sup>, um medidor de vazão com range de 2 a 45 litros/minuto, um osciloscópio Tektronix TDS 380 e um sensor de nível tipo boia, para garantir a repetibilidade do experimento. Foi utilizada uma bomba periférica Intech Machine BP 500, de ½ HP. O detalhamento dos materiais e métodos utilizados para a construção da bancada podem ser encontrados no trabalho “Construção de uma bancada experimental para validação de modelo teórico de alimentação de reservatórios de água” (Almeida J.C.P. 2019).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em diferentes etapas:

1. Desenvolvimento de um programa no EES capaz de encontrar o tempo de enchimento de um dado reservatório por cima e por baixo a partir das equações descritas na revisão bibliográfica;
2. Escolha de uma bomba periférica de baixo custo e vazão razoável para montagem da bancada;
3. Simulação de várias configurações diferentes da bancada, a partir dos dados da bomba e da disponibilidade de espaço do laboratório, variando o diâmetro da tubulação e o diâmetro e a altura do reservatório;
4. Construção da bancada a partir dos parâmetros selecionados na etapa anterior;
5. Aquisição dos dados experimentais da bancada, que foram usados para uma nova simulação no EES, a fim de comparar os valores reais e os esperados;
6. Comparação e validação dos resultados.

A escolha do EES como *software* de simulação se deu por conta da sua facilidade de uso, por ter uma interface bastante intuitiva, pela rapidez da compilação e pela familiaridade com o programa. A primeira etapa do programa é a inserção dos pontos da curva característica da bomba selecionada, para encontrarmos seus coeficientes  $a$  e  $b$  de acordo com a equação [1]. Depois, calculamos o volume e a área do reservatório a partir do diâmetro escolhido, e definimos a altura de sucção ( $H_1$ ), a altura até o fundo do reservatório ( $H_2$ ) e a altura até o topo do reservatório ( $H_3$ ). Também fornecemos o comprimento total (comprimento de tubulação mais comprimento equivalente de acessórios) até a parte de baixo ( $L_1$ ) e a de cima ( $L_2$ ) do tanque. Por fim, devemos definir o diâmetro da tubulação em milímetros, o  $K_v$  da válvula globo, que será considerado como comum para ambas as configurações, e outros fatores como  $g$ ,  $e$  e  $ni$ .

A partir dos dados fornecidos e das equações [1], [2], [3] e [8], conseguimos definir a vazão de enchimento por cima do tanque, que é constante, e, conseqüentemente, o tempo de enchimento. A vazão do enchimento por baixo varia, pois a altura do

líquido varia e, com isso, a altura que a bomba precisa atingir. Por isso, foi criado um *loop* de 200 iterações que gera uma tabela paramétrica dos valores de vazão e tempo em cada instante  $i$ .

Porém, também precisamos saber qual o volume preenchido por líquido no instante  $i$  do enchimento, para sabermos se o limite do reservatório foi atingido ou não. Para isso, podemos integrar a vazão do instante  $t = 0$  até  $t = i$ . Uma vez que o EES é um programa relativamente simples, não há uma função de integração em sua biblioteca. Para contornarmos esse problema, o volume foi escrito como:

$$\sum_{j=1}^i [(Q_{i_j} + Q_{i_{j+1}}) * (\frac{t_{j+1} - t_j}{2})] \quad [9]$$

Onde  $Q_i$  é a vazão no instante  $i$  e  $t_i$  é o tempo também no instante  $i$ . Nota-se que a equação [9] é basicamente uma Soma de Riemann, e podemos aumentar ou diminuir a quantidade de valores calculados apenas mudando o número de iterações do *loop*.

A escolha da bomba foi feita a partir de uma pesquisa das bombas disponíveis no mercado, levando em conto o custo, tamanho e vazão máxima da mesma. A bomba escolhida foi uma bomba periférica Intech Machine BP 500, de  $\frac{1}{2}$  HP, vazão máxima de 1980 litros por hora e altura manométrica máxima de 26 metros. É uma bomba de fácil instalação e adequada para uso com tubulações de PVC. O fabricante disponibiliza a curva Q x H no manual do equipamento da seguinte forma:

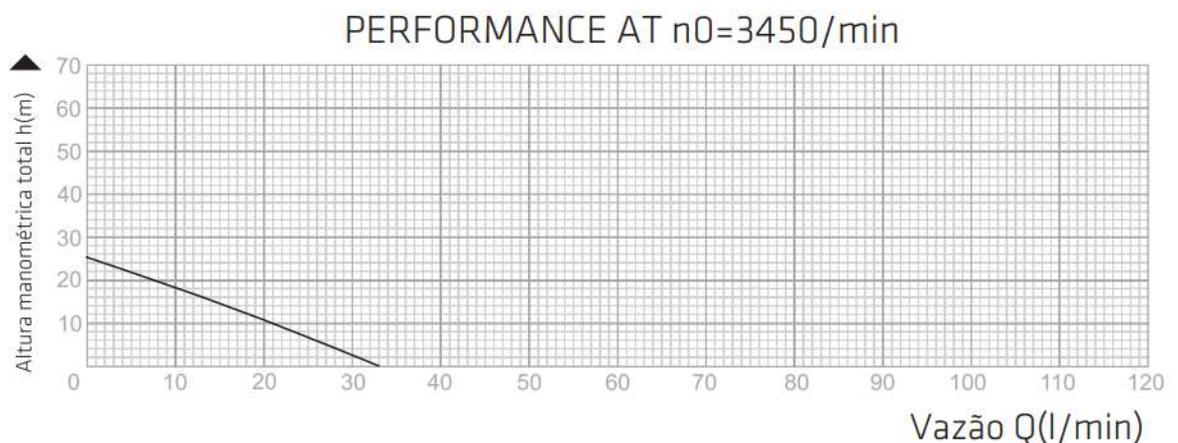


Figura 3.6 - Curva Q x H da bomba Intech Machine BP 500, de acordo com o manual do fabricante

Com os dados da bomba e os parâmetros físicos do espaço da bancada definidos, foram simuladas várias configurações diferentes até definirmos o arranjo que oferecesse maior diferença de tempo entre o enchimento por baixo e o enchimento por cima. Durante esse processo, percebeu-se que diâmetros menores da tubulação ofereciam resultados melhores, pois, como dito no capítulo anterior, um diâmetro menor oferece mais resistência à passagem de água, aumenta a perda de carga no sistema e requer uma pressão maior da bomba. Por isso, foi selecionado o encanamento de PVC com menor diâmetro comercialmente disponível, de  $\frac{1}{2}$  polegada ou 17 milímetros.

Quanto ao volume do reservatório, procurou-se uma configuração que oferecesse a maior altura possível no espaço disponível, pois, como evidenciamos na equação [8], a altura do líquido é essencial para o cálculo do tempo de enchimento. Outro fator importante foi o diâmetro do tanque, uma vez que é necessário encontrar um volume que ofereça um tempo razoável de enchimento: nem rápido demais, nem demorado demais. Além disso, foi importante considerar o peso que o gancho de teto era capaz de suportar, para que o conjunto reservatório e água não ultrapasse o limite da resistência do suporte. Levando em consideração as características físicas da bancada e do teto, os diâmetros de tubulação PVC disponíveis comercialmente e o tempo estimado de enchimento do tanque, foi selecionado um tubo de 250 milímetros de diâmetro e 1,1 metro de comprimento, com tampa, como reservatório.

A partir dos parâmetros selecionados, a bancada experimental foi construída. A válvula de globo selecionada foi uma válvula comum, facilmente encontrada em qualquer loja de materiais hidráulicos, com um volante capaz de dar duas voltas completas entre a abertura total (100% aberta) e o fechamento total (0% aberta). Outros acessórios também foram implementados para a aquisição de dados, como dois manômetros (dispostos antes e depois da válvula globo), um medidor de fluxo tipo sensor Hall, e um medidor de nível tipo boia, calibrado para desligar a bomba assim que o reservatório fosse completamente preenchido.

Além disso, foram usadas mangueiras flexíveis e transparentes, válvulas esfera para o bloqueio de água de acordo com a configuração desejada, e vários acessórios como cotovelos, têes e conexões. Como citado anteriormente, o detalhamento dos

materiais e métodos utilizados para a construção da bancada podem ser encontrados no trabalho “Construção de uma bancada experimental para validação de modelo teórico de alimentação de reservatórios de água” (Almeida, J.C.P. 2019).

Para a aquisição de dados do medidor de vazão, foi utilizado um osciloscópio Tektronix TDS 380 e a curva característica do fluxo fornecida pelo fabricante. O reservatório foi pendurado no teto por meio de um gancho parafusado capaz de suportar até 80 quilos.

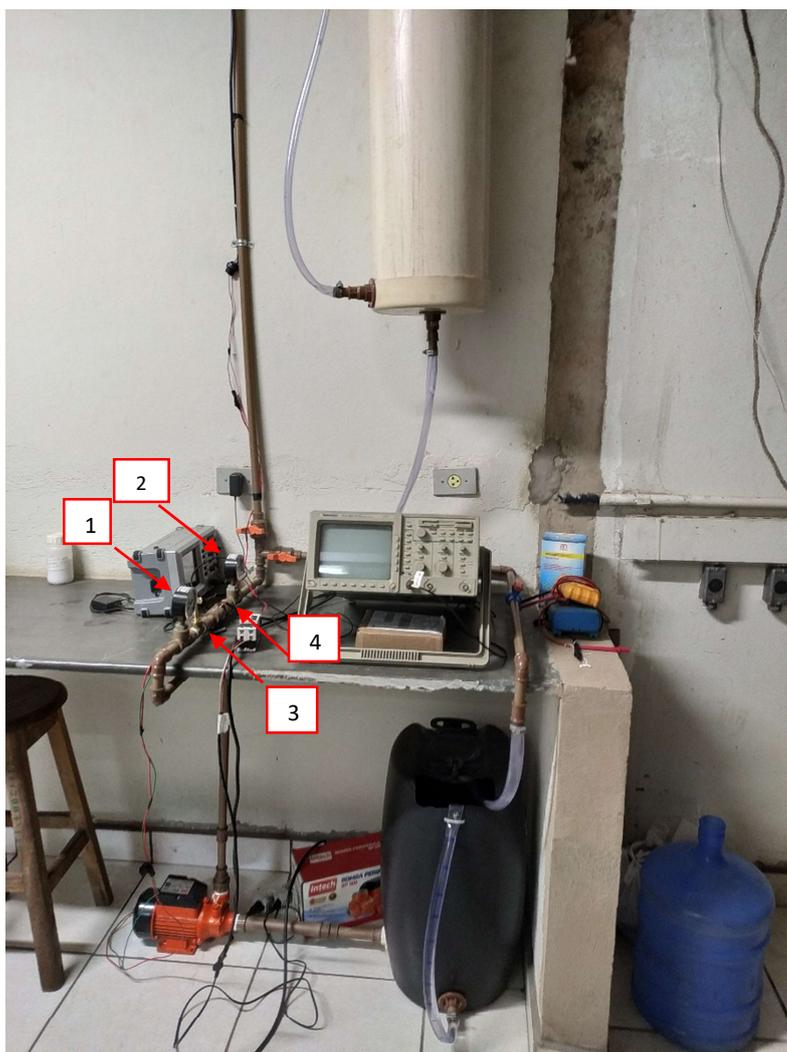


Figura 3.7 - Configuração da bancada experimental

Foi utilizada uma mangueira flexível para conectar a tubulação no reservatório para permitir a movimentação do tanque, uma vez que ele está suspenso. Também foram utilizadas mangueiras transparentes para medição do nível do tanque. Para evitar erros e garantir que o mesmo volume estava sendo preenchido no tempo contabilizado, o cronômetro era iniciado quando o nível do reservatório superior

atingia 10 litros e parava assim que o sensor de nível desligasse a bomba. Na figura 3.7, 1 e 2 são os manômetros, 3 é a válvula globo e 4 é o medidor de fluxo.

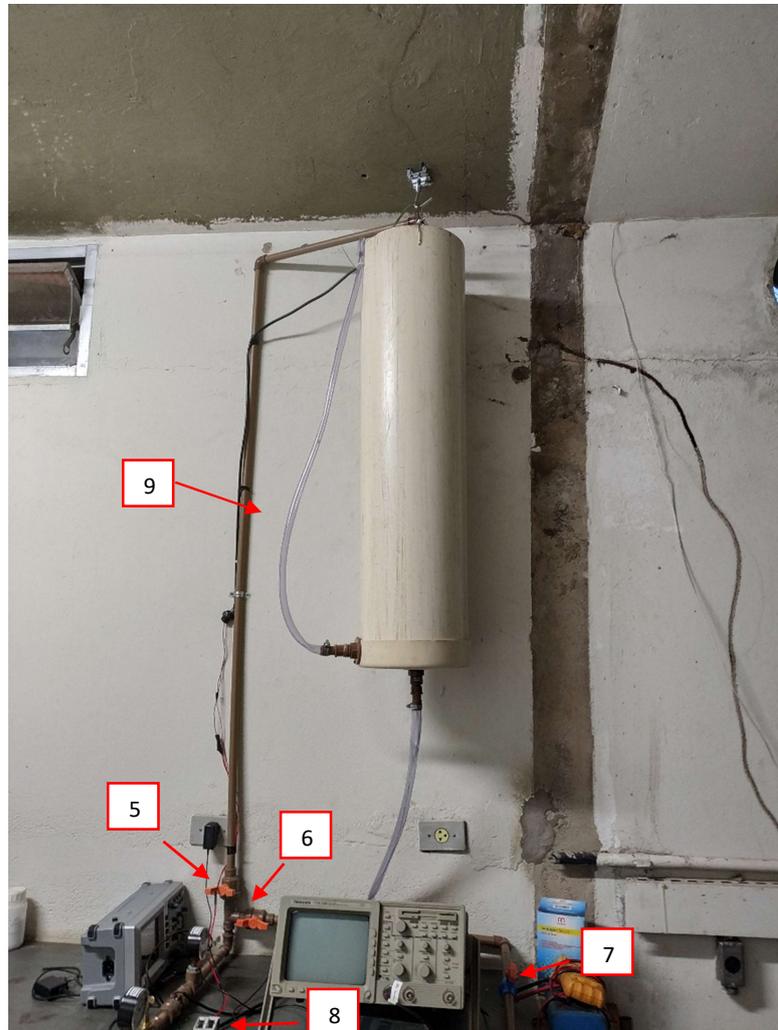


Figura 3.8 - Parte superior da bancada experimental

Uma vez que a válvula globo era capaz de completar 2 voltas do volante entre a abertura completa (100%) e o fechamento completo (0%), foi definido que meia volta do volante representaria 25% a menos de abertura da válvula. Assim, os testes foram feitos com 4 configurações diferentes: 100% aberta, 75% aberta, 50% aberta e 25% aberta.

Os dados foram adquiridos da seguinte maneira: a configuração desejada era selecionada a partir da abertura ou fechamento das válvulas de esfera (5 e 6) e o registro (3) era ajustado de acordo com a abertura desejada, e então a bomba era acionada a partir do interruptor (8). Assim que a água atingisse a marca de 10 litros

no medidor de nível (9), o cronômetro era iniciado. Depois, anotou-se os valores de pressão aferidos pelos manômetros de número 1 e 2 (antes e depois da válvula), e, com o osciloscópio ajustado para mostrar a curva e frequência do medidor de fluxo no *display*, as cinco frequências mais recorrentes foram anotadas.

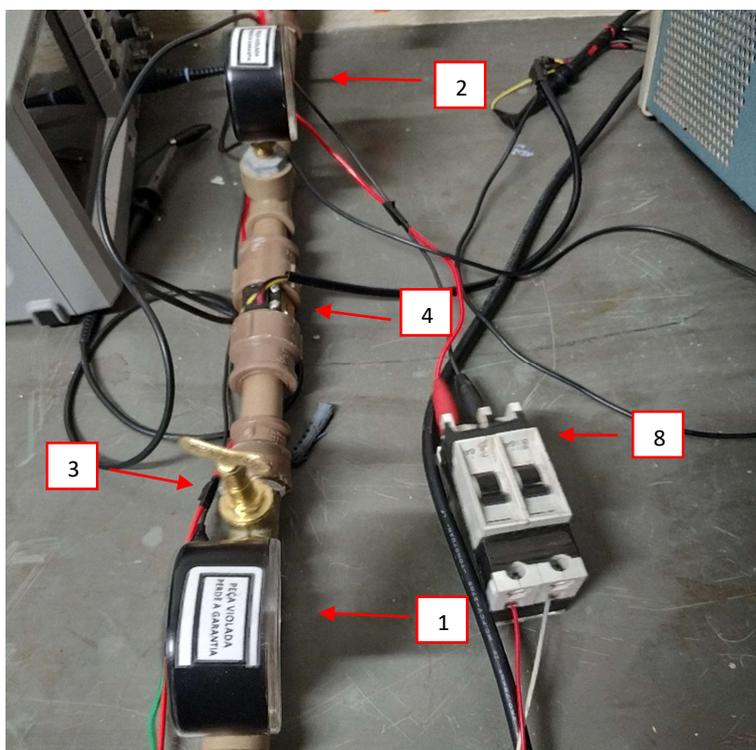


Figura 3.9 - Detalhe da configuração da bancada

No enchimento por baixo, quando o nível de água atingia 20 litros, era feita uma nova tomada das frequências, e assim sucessivamente a cada 10 litros até que o reservatório fosse preenchido. No enchimento por cima, uma vez que o fluxo é constante, apenas as 5 frequências predominantes foram anotadas. Com cada conjunto de frequências, foi feita a média dos valores e o descarte de dados que ultrapassassem a média mais ou menos duas vezes o desvio padrão. Assim, foi feita novamente a média com o novo conjunto de dados e o fluxo pôde ser encontrado a partir da seguinte equação da curva do sensor, fornecida pelo fabricante:

$$F = 8.1Q - 3 \text{ [10]}$$

O cronômetro era pausado no instante em que o sensor de nível desligava a bomba. Depois, as válvulas 5 e 6 eram fechadas e a válvula de esfera (7) era aberta para esvaziamento do reservatório e início de um novo teste. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada configuração de cada porcentagem de abertura da

válvula, para obtermos a média de tempo e diminuirmos o erro. Assim que as três medições para uma dada abertura era completada, a configuração era invertida por meio das válvulas 5 e 6 e o procedimento era feito novamente para o novo modo de enchimento.

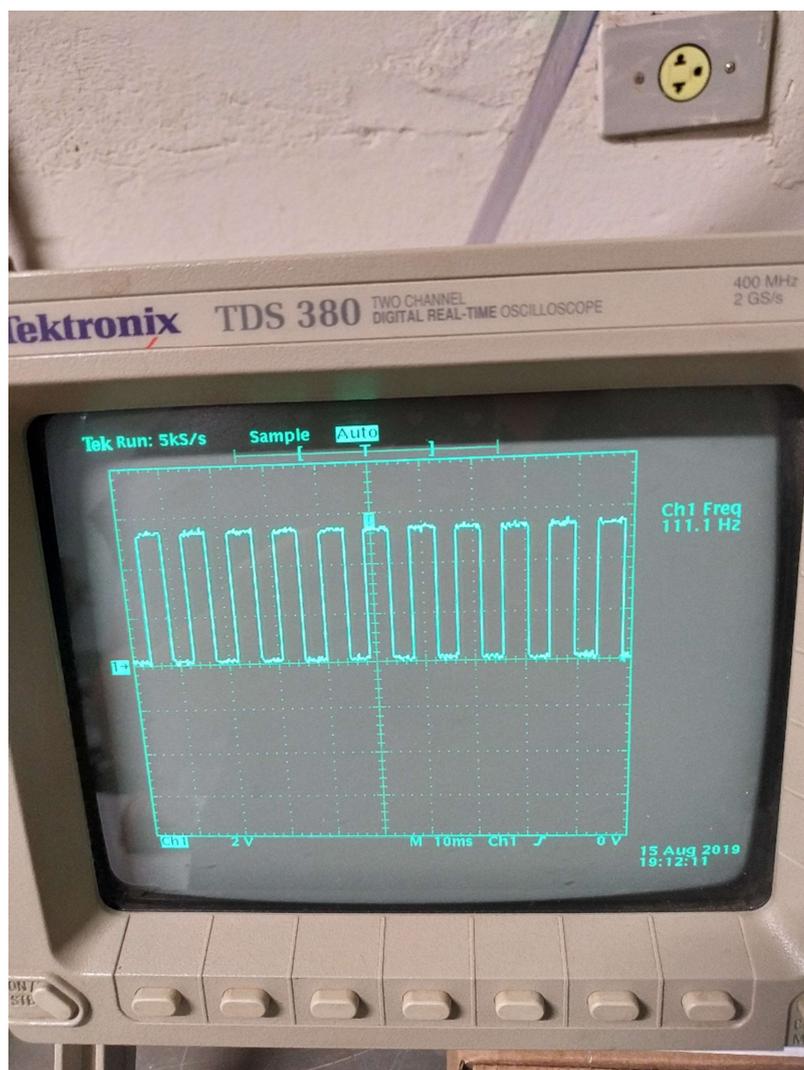


Figura 3.10 - Onda quadrada característica do medidor de fluxo e a frequência da mesma no *display* do osciloscópio

Uma vez que há uma queda de pressão considerável após a válvula globo, o manômetro 2 não possuía escala suficiente para aferir com precisão a pressão após o registro, e os valores aferidos pelo mesmo não foram considerados. Para calcularmos o  $K_v$ , consideramos o fluxo médio encontrado a partir do medidor de vazão, a pressão tomada pelo manômetro 1 e a pressão após o registro como zero.

Dessa forma, foi possível calcular o  $K_v$  para cada configuração de abertura da válvula e de enchimento do tanque.

Com todos os experimentos feitos, toda a tubulação foi medida e os acessórios contabilizados para definição dos valores de H1, H2, H3 e L1 e L2. O programa do EES foi alimentado com os dados dos resultados experimentais, para comparação entre os valores reais de tempo e vazão e os simulados.

Uma vez que a bancada é um sistema hidráulico de pequena escala, mesmo com os artifícios utilizados para aumentar a perda de carga na tubulação, a diferença de tempo encontrada foi relativamente pequena. Apesar disso, os dados experimentais são de extrema importância para validação do programa no EES, e permitem entender melhor as fontes de erros do programa e sua acuracidade. Isso possibilita o aprimoramento do programa, para que o mesmo possa ser utilizado em outras aplicações dos mais diversos tamanhos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dentre todas configurações de abertura da válvula, as porcentagens de abertura que apresentaram melhores resultados foram as de 75% e 50%, e, por isso, serão apresentadas em maior profundidade neste capítulo. Na Tabela 4.1, temos a disposição dos dados de tempo médio dessas porcentagens e a diferença entre o tempo de enchimento por cima e o tempo de enchimento por baixo.

Tempo real [min]			
Abertura da válvula	Por cima	Por baixo	Diferença
75%	02:32.08	02:27.74	2,85%
50%	02:42.31	02:38.07	2,61%

Tabela 4.1- Tempo de enchimento real e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta

Nota-se que a diferença, apesar de pequena, existe e confirma que o enchimento é mais rápido por baixo. Ao contrário do esperado, uma válvula mais aberta teve uma diferença de tempo maior que a válvula mais fechada, que oferece mais resistência à passagem de fluxo e maior perda de carga.

Na Tabela 4.2, temos o fluxo correspondente a partir das frequências médias medidas pelo sensor Hall, de acordo com a equação [10].

Vazão real [m <sup>3</sup> /h]				
	Litros	Por cima	Por baixo	Diferença
	75%	20	0,904	0,953
30		0,926		2,32%
40		0,926		2,32%
50		0,910		0,55%
50%	Litros	Por cima	Por baixo	Diferença
	20	0,839	0,872	3,93%
	30		0,847	0,95%
	40		0,847	0,95%
	50		0,841	0,24%

Tabela 4.2 - Vazão real e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta

Como previsto, a vazão no enchimento por baixo começa maior que a vazão do enchimento por cima, e decresce com o aumento da altura do líquido no reservatório até que os valores se igualem. A pressão antes do registro 75% aberto foi de 1 bar, e para o registro 50% aberto tivemos 1,2 bar. Para o cálculo do  $K_v$ , a vazão considerada foi a vazão do enchimento por cima do tanque.

De acordo com a equação [4], encontramos  $K_{v1} = 0,904$  para a válvula 75% aberta, e  $K_{v2} = 0,765$  para a válvula 50% aberta. Também definimos os seguintes valores dos parâmetros físicos da bancada em metros:  $H1=0$ ,  $H2=1,495$ ,  $H3=2,598$ ,  $L1=12,38$  e  $L2=10,963$ . Esses dados foram colocados no EES para a simulação dos resultados e comparação com os valores reais. O tempo de enchimento encontrado pelo programa estão dispostos na Tabela 4.3.

Tempo simulado [min]			
% abertura da válvula	Por cima	Por baixo	Diferença
75%	02:39.42	02:35.54	2,63%
50%	02:55.20	02:51.56	2,12%

Tabela 4.3 - Tempo de enchimento simulado e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta

Percebe-se que a diferença entre os tempos simulados por cima e por baixo é similar ao valores reais encontrados, o que sugere que o programa tem boa confiabilidade nesse aspecto. Assim, a simulação no EES também confirma que o enchimento é mais rápido por baixo. Na Tabela 4.4, temos as vazões simuladas pelo programa.

Vazão simulada [m <sup>3</sup> /h]				
	Litros	Por cima	Por baixo	Diferença
	75%	20	0,903	0,917
30		0,912		1,02%
40		0,907		0,48%
50		0,903		0,00%
50%	Litros	Por cima	Por baixo	Diferença
	20	0,821	0,834	1,58%
	30		0,829	0,97%
	40		0,825	0,49%
	50		0,821	0,00%

Tabela 4.4 - Vazão simulada e diferença por cima e por baixo com a válvula 75% e 50% aberta

No caso da vazão, os valores encontrados pelo programa tem uma diferença menor do que os valores reais, mas seguem as mesmas tendências. Na bancada experimental, existe uma diferença entre a vazão por baixo e a por cima aos 50 litros. Isso acontece pois a tubulação que alimenta o tanque está levemente acima do nível de água máximo do reservatório, enquanto a simulação ignora esse desnível. Além disso, foi possível obter os gráficos de vazão x tempo e volume x tempo do enchimento por baixo por meio da simulação, como visto pelas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14.

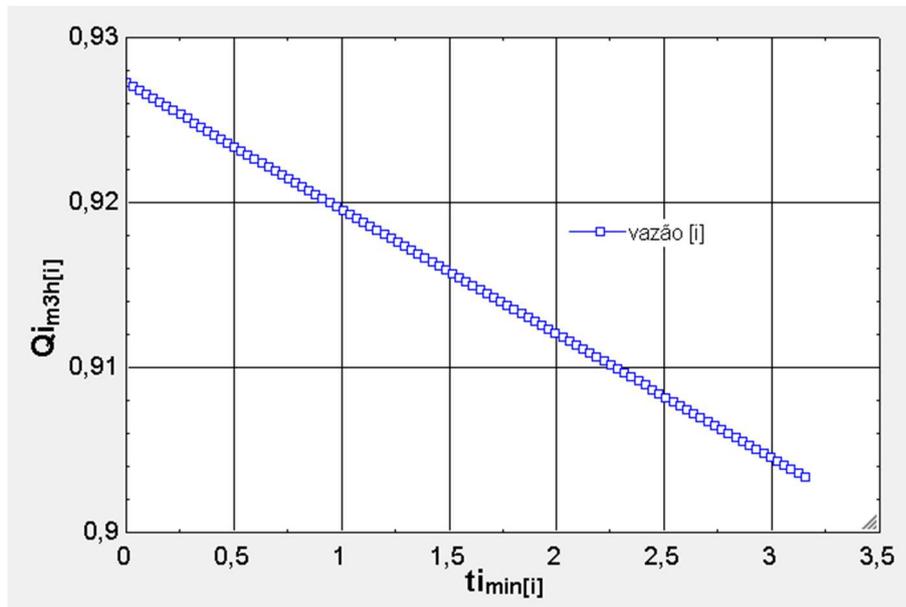


Figura 4.11 - Vazão [ $m^3/h$ ] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta

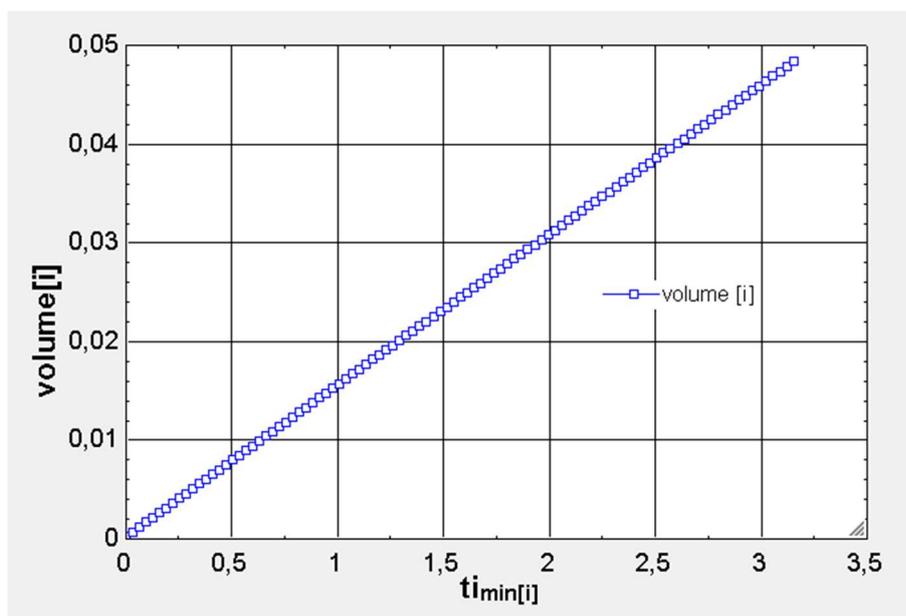


Figura 4.12 - Volume [ $m^3$ ] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta

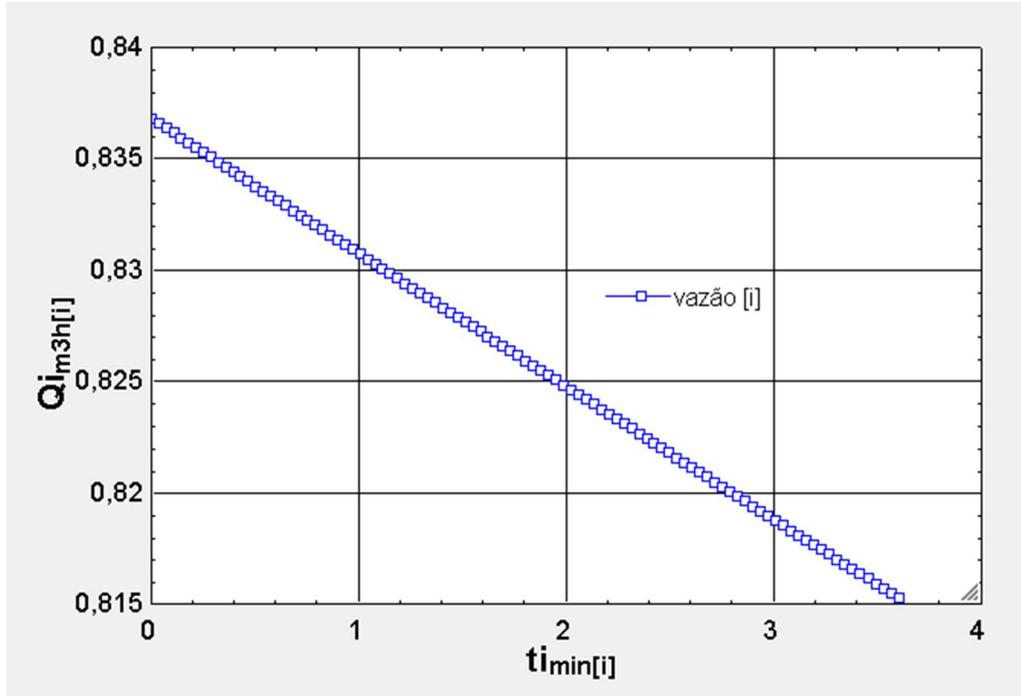


Figura 4.13 - Vazão [ $m^3/h$ ] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 50% aberta

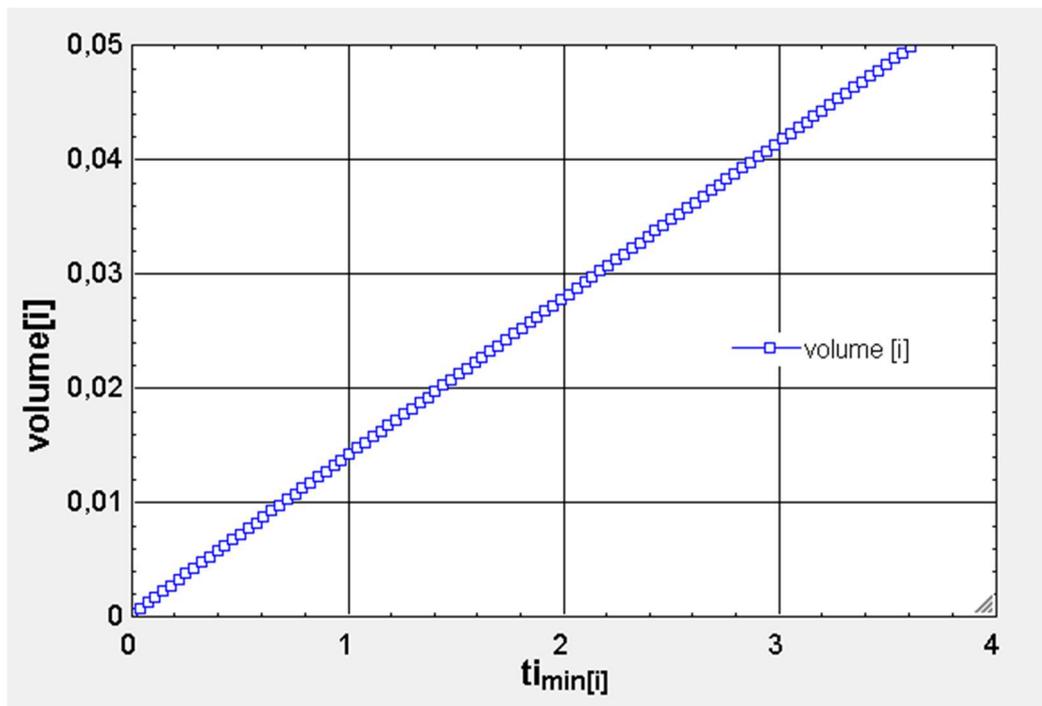


Figura 4.14 - Volume [ $m^3$ ] em função do tempo [min] no enchimento por baixo com a válvula 50% aberta

Nota-se que os gráficos incluem as informações dos 10 primeiros litros do enchimento do reservatório, que foram ignorados na Tabela 4.4 a fim de garantir as mesmas condições de enchimento para as duas configurações.

De forma geral, tanto os dados da bancada quanto os dados da simulação comprovam que o enchimento de um reservatório de água é mais rápido por baixo do que por cima. Porém, é importante confrontar os resultados reais e os simulados, para verificarmos a acuracidade do programa e quais pontos podem ser melhorados. Dessa forma, as Tabelas 4.5 e 4.6 comparam a diferença entre o real e o simulado em relação ao tempo para as duas configurações do registro.

<b>Comparação entre os tempos para a válvula 75% aberta [min]</b>			
<b>Configuração</b>	<b>Simulado</b>	<b>Real</b>	<b>Diferença</b>
<b>Por cima</b>	02:39.42	02:32.08	4,83%
<b>Por baixo</b>	02:35.54	02:27.74	5,14%

Tabela 4.5 - comparação entre o tempo real e o simulado das duas configurações para a válvula 75% aberta

<b>Comparação entre os tempos para a válvula 50% aberta [min]</b>			
<b>Configuração</b>	<b>Simulado</b>	<b>Real</b>	<b>Diferença</b>
<b>Por cima</b>	02:55.20	02:42.31	7,94%
<b>Por baixo</b>	02:51.56	02:38.07	8,53%

Tabela 4.6 - comparação entre o tempo real e o simulado das duas configurações para a válvula 50% aberta

A partir desses resultados, percebe-se que a simulação estimou tempos maiores de enchimento do que o real, o que sugere que o programa é mais conservador que bancada e pode estar superestimando a perda de carga no sistema. Mesmo assim, para a válvula 75% aberta, as diferenças ficaram por volta de 5%, o que é aceitável. Para o registro 50% aberto, houve uma disparidade mais próxima dos 10%, o que fortalece a hipótese de que a simulação superestima as perdas de carga na válvula. As Tabelas 4.7 e 4.8 comparam a vazão estimada e a vazão real.

<b>Comparação entre as vazões para a válvula 75% aberta [m³/h]</b>				
	<b>Litros</b>	<b>Simulado</b>	<b>Real</b>	<b>Diferença</b>
	<b>Por cima</b>	<b>20</b>	0,903	0,904
<b>30</b>				
<b>40</b>				
<b>50</b>				
<b>Por baixo</b>	<b>Litros</b>	<b>Simulado</b>	<b>Real</b>	<b>Diferença</b>
	<b>20</b>	0,917	0,953	3,93%
	<b>30</b>	0,912	0,926	1,54%
	<b>40</b>	0,907	0,926	2,09%
	<b>50</b>	0,903	0,910	0,78%

Tabela 4.7 - Comparação entre real e simulado das vazões para a válvula 75% aberta [m³/h]

Vazão simulada e real para a válvula 50% aberta [m <sup>3</sup> /h]				
Por cima	Litros	Simulado	Real	Diferença
	20	0,821	0,839	2,19%
	30			
	40			
	50			
Por baixo	Litros	Simulado	Real	Diferença
	20	0,834	0,872	4,56%
	30	0,829	0,847	2,17%
	40	0,825	0,841	1,94%
	50	0,821	0,827	0,73%

Tabela 4.8 - Comparação entre real e simulado das vazões para a válvula 50% aberta [m<sup>3</sup>/h]

Mais uma vez, as diferenças são maiores quando o registro está mais fechado, o que indica que a perda de carga pode estar sendo superestimada na simulação. Apesar disso, as diferenças na vazão em ambos os casos não passa de 5%, indicando que o programa é bastante confiável nesse aspecto. A diferença também tende a diminuir à medida que o reservatório enche, sendo menor que 1% nos últimos 10 litros nos dois casos. O enchimento por cima também apresenta baixo erro nas duas situações, especialmente com o registro 75% aberto, onde a diferença é muito pequena.

De forma geral, o programa se mostrou bastante confiável e próximo aos dados da bancada, especialmente ao estimar a vazão de água. Todos os resultados da simulação foram maiores que os experimentais, mostrando que o programa estima uma perda de carga maior do que a real. Isso pode ser atribuído a erros de arredondamento e simplificações do problema, como considerar que a pressão após o registro é zero.

Outro possível problema no programa é o valor de  $K_v$ . No enchimento por cima, a vazão se mantém praticamente constante, e o valor de  $K_v$  também. Porém, no enchimento por baixo, uma vez que a vazão varia,  $K_v$  também varia. Isso foi ignorado na simulação, e o coeficiente foi considerado constante e igual para as duas configurações.

Os coeficientes da bomba também podem ser diferentes dos reais, uma vez que a curva da bomba fornecida pelo fabricante, de acordo com a ISO 9906 Anexo A, tolera +/- 9% nos valores de vazão e +/- 7% nos valores de altura manométrica. O medidor de fluxo também tem uma precisão entre 5 e 10% de acordo com o fabricante,

o que é uma outra fonte de erros. Uma maneira de contornar esses problemas é calibrar esses dois equipamentos e confrontar os dados de ambos fabricantes com os dados experimentais, porém esse estudo foge do escopo do atual trabalho. Para refinarmos ainda mais os dados do sensor Hall, um osciloscópio mais moderno também pode ser utilizado, para eliminar possíveis ruídos da onda e calcular a frequência média da onda de maneira mais precisa.

Outro acessório que pode ser utilizado para melhorar ainda mais a bancada experimental é uma célula de carga, posicionada no suporte do gancho de teto. A célula de carga pode ser usada para termos uma calibração precisa tanto da bomba quanto do medidor de vazão, por meio da medição do peso do reservatório em um dado instante. Como sabemos a densidade da água e o diâmetro do reservatório, podemos encontrar o volume no tanque com mais precisão do que o medidor de nível atual oferece. Por último, também podemos aumentar o número de iterações no *loop* utilizado para calcular os pontos da vazão do enchimento por baixo.

Uma vez que validamos o programa no EES e confirmamos sua confiabilidade, podemos simular um sistema hidráulico de grandes proporções que evidencie ainda mais a diferença de tempo entre as duas configurações de enchimento. Para essa simulação, levaremos em conta os mesmos dados da bancada atual, mas aumentaremos o volume do reservatório de 50 litros para 500 litros, ou seja, manteremos o diâmetro, mas multiplicaremos a altura do reservatório dez vezes. Uma vez que a bomba escolhida é capaz de atingir até 26 metros de altura manométrica, essa simulação pode ser testada experimentalmente em trabalhos futuros. Também iremos considerar que a válvula está 75% aberta, já que tivemos uma acuracidade melhor com essa configuração. Logo,  $K_v = 0,904$ . Dessa forma, temos os seguintes resultados:

Tempo simulado [min]			
Abertura da válvula	Por cima	Por baixo	Diferença
75%	43:21.00	37:39.21	15,10%

Tabela 4.9 - Diferença de tempo entre as duas configurações em um sistema simulado com a válvula 75% aberta

Na Tabela 4.9, temos uma diferença muito mais expressiva de tempo, que condiz com o aumento de altura do tanque. Isso prova a hipótese de que a configuração de enchimento impacta mais fortemente em sistemas hidráulicos de

grande porte, especialmente naqueles em que o reservatório tem uma altura expressiva. Da mesma maneira que foi feito anteriormente, vamos analisar a diferença de vazão entre as duas configurações e os gráficos gerados pelo EES. Uma vez que o volume simulado é expressivo, vamos considerar a vazão do enchimento por baixo a cada 100 litros. Os resultados estão na Tabela 4.10.

Vazão simulada [m <sup>3</sup> /h]				
75%	Litros	Por cima	Por baixo	Diferença
	0	0,692	0,932	34,74%
	100		0,883	27,60%
	200		0,834	20,65%
	300		0,787	13,73%
	400		0,741	7,08%
	500		0,692	0,00%

Tabela 4.10 - Diferença de vazão entre as duas configurações em um sistema simulado com a válvula 75% aberta

A Tabela 4.10 deixa clara a enorme diferença de vazão entre as duas configurações, especialmente nos 200 primeiros litros. Como esperado, mais uma vez a vazão diminui de acordo com o nível de água do reservatório até que a diferença entre os dois modos de enchimento seja zero. Por fim, temos os gráficos de vazão (Figura 4.15) e volume (Figura 4.16) em função do tempo gerados pelo EES.

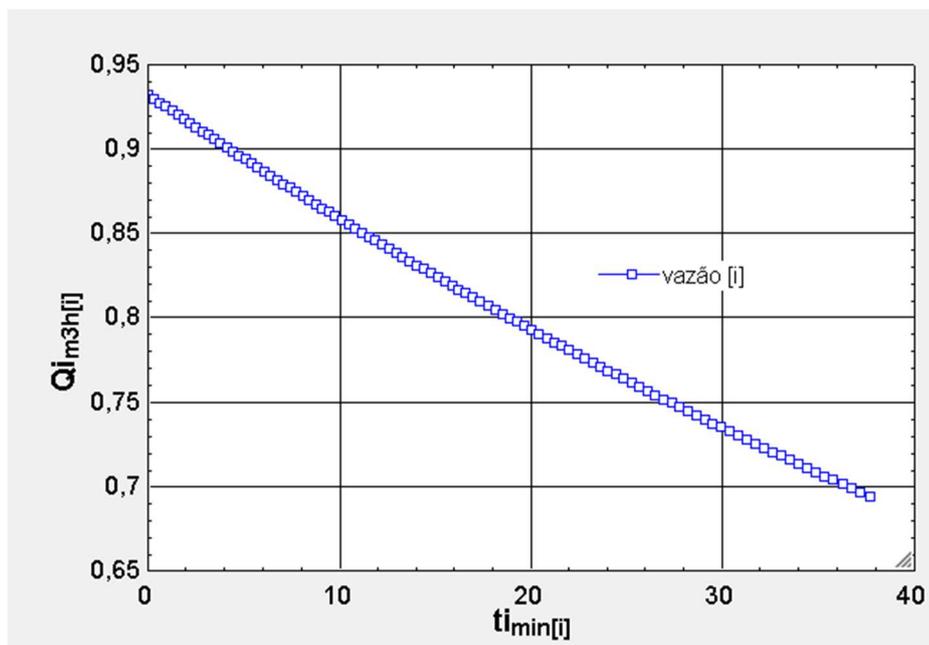


Figura 4.15 - Vazão [m<sup>3</sup>/h] em função do tempo [min] da simulação no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta

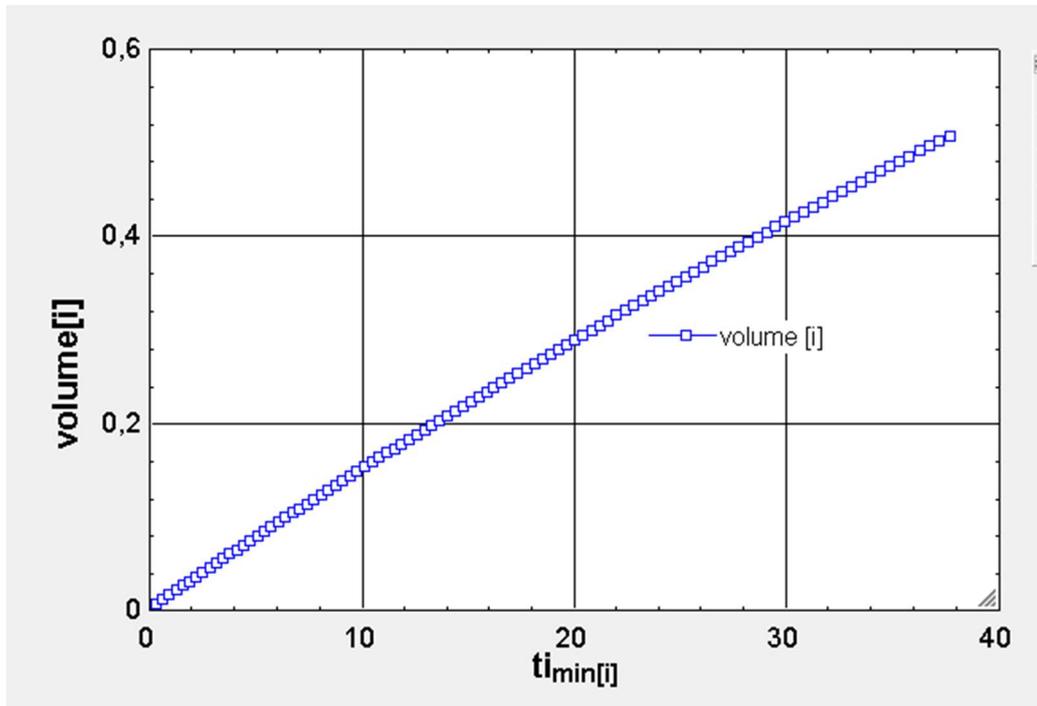


Figura 4.16 - Volume [ $m^3$ ] em função do tempo [min] da simulação no enchimento por baixo com a válvula 75% aberta

Os gráficos oferecem uma visão melhor sobre o comportamento do volume e da vazão, e evidenciam que o comportamento desses dois fatores não é uma reta perfeita, apesar de se aproximarem de um perfil linear.

Finalmente, a partir dos dados experimentais foi possível validar o equacionamento matemático e o programa no EES. Com isso, podemos extrapolar a simulação para inúmeros sistemas hidráulicos, especialmente aqueles com tanques com uma altura significativa, para otimizarmos o processo de enchimento e economizarmos tempo e dinheiro.

Como todo experimento, há abertura para melhorias tanto na bancada quanto na simulação, especialmente nos pontos citados anteriormente nesse capítulo. Esses ajustes são importantes para melhorarmos a acuracidade do programa de forma geral e prevermos com mais precisão o comportamento de um sistema hidráulico.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1 Conclusões gerais

O presente trabalho permitiu a avaliação de duas configurações diferentes para o enchimento de um reservatório de água, tanto matematicamente quanto experimentalmente. Por isso, este estudo proporcionou uma união dos conhecimentos técnicos adquiridos ao longo do curso e a obtenção de novos conhecimentos de práticas de engenharia, especialmente por propor a solução de um problema comum na hidráulica.

De forma geral, comprovamos que o enchimento de um tanque é mais rápido por baixo do que por cima, tanto matematicamente quanto experimentalmente. Em um sistema de pequeno porte, como foi o caso da bancada construída, as diferenças também são pequenas, especialmente se não há a presença de válvulas de regulagem nem muitos acessórios.

No caso da bancada abordada neste trabalho, as diferenças entre as duas configurações de enchimento ficou entre 2 e 3%, tanto experimentalmente quanto na simulação. Porém, isso foi o suficiente para provar que a altura do tanque tem um grande impacto no tempo de enchimento do reservatório, o que foi evidenciado na simulação seguinte onde multiplicamos a altura do tanque dez vezes e mantivemos todas as outras características da bancada. Neste caso, a diferença entre os dois modos de enchimento chegou a cerca de 15%.

Este trabalho também validou o programa desenvolvido no EES, levantando tanto os pontos onde a simulação tem mais erros quando comparada com a bancada quanto as possíveis fontes de erro do modelo computacional e do modelo físico. Percebe-se que o programa tende a superestimar o tempo de enchimento e subestimar a vazão quando a válvula está mais fechada, o que gerou diferenças por volta de 8% entre o tempo real e o simulado para a válvula 50% fechada.

Para o registro 75% aberto, a simulação se mostrou mais fiel aos resultados, especialmente em relação ao enchimento por cima. Apesar da discrepância entre os

valores de vazão e tempo real e simulado, a diferença de tempo entre as configurações se manteve na mesma proporção nas duas situações. Isso quer dizer que, por mais que o programa possa se distanciar dos valores exatos de vazão e tempo de enchimento, ele tem boa precisão ao calcular quão mais rápido é o enchimento por baixo se comparado com o enchimento por cima em porcentagem. Isso, por si só, já é uma ferramenta valiosa no projeto de sistemas hidráulicos grandes e tanques com altura considerável.

De forma geral, alguns pontos podem ser melhorados na simulação e na bancada. Isso inclui diminuir arredondamentos, levar em consideração fatores como a pressão após a válvula e a variação do  $K_v$  no enchimento por baixo e calibrar os instrumentos utilizados (bomba, medidor de fluxo, manômetro), entre outros. A implementação de um célula de carga no sistema, para medição do peso do tanque, também traria informações importantes para futuros trabalhos.

Finalmente, este trabalho cumpre seu objetivo de provar, matematicamente e experimentalmente, que o enchimento de um tanque de água por baixo é mais rápido e efetivo do que o enchimento por cima. Isso possibilita a otimização de processos e pode gerar uma economia de tempo e dinheiro em grandes sistemas hidráulicos, nas mais diversas aplicações.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se aprimorar os pontos levantados anteriormente, com ênfase especial na calibração dos instrumentos por meio da célula de carga. Esses ajustes tornarão o programa muito mais preciso na hora de simular um sistema hidráulico, além de melhorarem a bancada para futuros experimentos. Também é possível realizar a troca do tanque atual para um reservatório com a altura dez vezes maior, de acordo com a situação simulada no capítulo anterior, para reafirmarmos a vantagem de tempo do enchimento por baixo e confrontarmos os dados simulados com os dados reais.

Outra sugestão inclui o cálculo da economia efetiva de energia envolvida na otimização do sistema de enchimento, ou seja, quanto se deixa de gastar ao

encheremos um reservatório por baixo. Um ponto de partida interessante é calcular o gasto de energia elétrica da bomba, já que diminuimos seu tempo de trabalho quando diminuimos o tempo de enchimento do tanque.

Por fim, uma vez que o programa foi validado, ele também pode ser aplicado em sistemas já existentes, para verificação da eficiência deste e para geração de estimativas de tempo e vazão. Isso pode ser uma informação valiosa para os mais diversos tipos de indústria e comércios, e até mesmo para aplicações residenciais.

## Referências Bibliográficas

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1987.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Instalações hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

MATTOS, Edson Ezequiel; FALCO, Reinaldo. **Bombas industriais**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

GILES, Ranald V. **Mecânica dos fluídos e hidráulica**. São Paulo: Editora McGrawHill Ltda, 1996.

PFLEIDERER, C., PETERMANN, H., **Máquinas de Fluxo**, Livros Técnicos e Científicos, 1979.

BARBOSA, J. R., **Máquinas de Fluxo**, São José dos Campos, ITA, 2010.

SILVA TELLES, P.C. **Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem**. 10a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001.

SILVA TELLES, P.C. **Tubulações Industriais – Cálculo**. 9a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1999.

SILVA TELLES, P.C.; PAULA BARROS, D.G. **Tabelas e Gráficos para Projetos de Tubulações**. 6a. edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1998.

BETCH IV, C. **Process Piping – The Complete Guide to ASME B31.3**. ASME Press, New York. 2002.

PETROBRAS. N-57: **Projeto mecânico de tubulação industrial**. 1994.

BARTH, F. T.; POMPEU, C. P.; et alii. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Humanos/Livraria Nobel, 1987.

SOTOMAYOR, H. B. **Estudo comparativo entre válvulas hidráulicas**. Rio de Janeiro, UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

ALMEIDA, J.C.P. **Construção de uma bancada experimental para validação de modelo teórico de alimentação de reservatórios de água**. Uberlândia/UFU,2019.

NOVAK, P., **Developments in Hydraulic Engineering**, 5 ed, Londres, Editora Elsevier, 2005.

AZEVEDO NETO, M. F. Fernandez, R. Araujo, A. E. Ito. **Manual de Hidráulica**. São Paulo, Edigar Blucher, 1998 8ª ed.

BAPTISTA, M; LARA M. **Fundamentos da Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: UFMG, 2002.

LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972.

MACINTYRE, A.J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. São Carlos, EESC/USP, 1998.

GARCEZ, L.N. **Elementos de Mecânicas de Fluidos e Hidráulica Geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1960, 2v.

HENN, E.A.L. **Máquinas de fluido**. 2ª ed, Porto Alegre: UFSM, 2006.

White, F.M., **Fluid Mechanics**. Mc Graw Hill, 2002.

WIENDL, W. G., **Tubulações para água**, São Paulo: Centro Tecnológico de Saneamento Básico, 1973.

GUIMARÃES, L.B. **Máquinas hidráulicas**. Curitiba: UFPR, 1991.