



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

OTO BARBOSA DE ANDRADE

**MODELO DE DIMENSIONAMENTO PARA TANQUES DE ESCORVA
VERTICAIS E HORIZONTAIS BASEADOS NA LEI DE BOYLE COM
CORREÇÃO PERCENTUAL**

RECIFE
2025

OTO BARBOSA DE ANDRADE

**MODELO DE DIMENSIONAMENTO PARA TANQUES DE ESCORVA
VERTICAIS E HORIZONTAIS BASEADOS NA LEI DE BOYLE COM
CORREÇÃO PERCENTUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Agrícola e Ambiental da
Universidade Federal de Rural de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Manassés Mesquita da Silva

RECIFE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

A554m Andrade, Oto Barbosa de.
 Modelo de dimensionamento para tanques de escorva
 verticais e horizontais baseados na lei de Boyle com
 correção percentual / Oto Barbosa de Andrade. – Recife,
 2025.
 56 f.; il.

 Orientador(a): Manassés Mesquita da Silva.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
 Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado
 em Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2025.

 Inclui referências.

 1. Bombas hidráulicas. 2. Efeito da explosão. 3.
 Estações de bombeamento. 4. Bombas de água I. Silva,
 Manassés Mesquita da, orient. II. Título

CDD 628

OTO BARBOSA DE ANDRADE

MODELO DE DIMENSIONAMENTO PARA TANQUES DE ESCORVA VERTICAIS E
HORIZONTAIS BASEADOS NA LEI DE BOYLE COM CORREÇÃO PERCENTUAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Agrícola e Ambiental da
Universidade Federal de Rural de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovado em: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manassés Mesquita da Silva (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. João Audifax César Albuquerque Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Rossini Daniel (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me guiou com sua sabedoria e me fortaleceu nos momentos de incerteza, iluminando cada passo desta jornada.

Agradeço aos meus pais, que sempre acreditaram em mim, e me proporcionaram todas as ferramentas necessárias para alcançar meus objetivos. Seu apoio financeiro, emocional, e principalmente, suas palavras de incentivo, foram essenciais para a realização deste trabalho. São poucas as pessoas que têm o privilégio de ter pais tão solícitos e amorosos como os meus são para mim.

Gostaria de agradecer aos meus professores da graduação, em especial ao professor Dr. Abelardo Montenegro, pelas valiosas lições que me transmitiu, que me inspiraram a buscar sempre o conhecimento, e que moldaram minha visão profissional. Igualmente, ao Dr. Manassés Mesquita, meu orientador, agradeço pela paciência, dedicação e orientação precisa. Sua expertise e conhecimento foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todos os colegas de curso que tive o prazer de conhecer e estudar. Especialmente ao meu amigo João Nagipe, agradeço pelo companheirismo, pelas conversas produtivas, e pelo apoio mútuo. Sua organização e comprometimento me inspiraram a buscar sempre o meu melhor. À minha amiga Maria Eloyse, agradeço pela amizade sincera, pelo apoio constante, e pelos momentos de descontração. Sua gentileza e ética me ensinaram a importância da empatia e do respeito.

Ao meu amigo Paulo Lucas, agradeço pela amizade incondicional, pelo apoio constante, e pela ajuda valiosa na realização deste trabalho. Sua presença me fortaleceu nos momentos de dificuldade, e sua amizade me ensinou a importância da lealdade.

RESUMO

A água é um recurso fundamental, e seu transporte eficiente depende geralmente de sistemas de bombeamento confiáveis, especialmente na agricultura irrigada. Nos casos de instalações com bombas acima do nível do reservatório, ordinariamente se faz o uso de válvulas-de-pé, que têm partes móveis suscetíveis ao mau funcionamento por desgastes, quebras, sujeira ou outros problemas, que limitam a confiabilidade desse sistema. Por meio deste trabalho apresenta-se uma formulação matemática para o dimensionamento de tanques de escorva como alternativa para substituição da válvulas-de-pé convencional, baseada na Lei de Boyle associada com a Lei da conservação da energia. Tal formulação teórica foi complementada com a aplicação de um coeficiente de correção específico para diferentes modelos de tanques. Além disso, propõe-se um modelo simplificado para tanques cilíndricos horizontais, que segundo a literatura é uma configuração otimizada de tanques de escorva. A validação do modelo proposto foi realizada por meio da comparação dos resultados teóricos com dados experimentais disponíveis na literatura. A aplicabilidade e precisão da modelagem pode ser confirmada pela exatidão dos cálculos. A equação de dimensionamento do tanque mostrou-se eficaz, desde que se realize um ajuste percentual considerando as especificidades do modelo de montagem com a recomendação de uma margem de segurança.

Palavras-chave: bombas hidráulicas, escorvamento, válvula de pé, tanque de escorva.

ABSTRACT

Water is a fundamental resource, and its efficient transport generally depends on reliable pumping systems, especially in irrigated agriculture. In cases of installations with pumps above the reservoir level, foot valves are commonly used. These valves have moving parts that are susceptible to malfunction due to wear, breakage, dirt, or other problems, which limit the reliability of the system. This work presents a mathematical formulation for the sizing of priming tanks as an alternative to replace conventional foot valves, based on Boyle's Law associated with the Law of conservation of energy. This theoretical formulation was complemented with the application of a specific correction coefficient for different tank models. Furthermore, a simplified model for horizontal cylindrical tanks is proposed, which, according to the literature, is an optimized configuration for priming tanks. The validation of the proposed model was performed by comparing the theoretical results with experimental data available in the literature. The applicability and accuracy of the modeling can be confirmed by the precision of the calculations. The tank sizing equation proved to be effective, provided that a percentage adjustment is made considering the specificities of the assembly model with the recommendation of a safety margin.

Keywords: hydraulics pumps, priming, foot valve, priming tank.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 2,16$ m.....	25
Tabela 2 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 2,16$ m.....	27
Tabela 3 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 2,16$ m.....	27
Tabela 4 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 2,16$ m.....	28
Tabela 5 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 4,85$ m.....	28
Tabela 6 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 4,85$ m.....	29
Tabela 7 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 4,85$ m.....	29
Tabela 8 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no dimensionamento vertical do tanque modelo 1 com aumento percentual teórico 'p' de 15%.....	30
Tabela 9 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 2,16$ m.....	31
Tabela 10 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 2,16$ m....	31
Tabela 11 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 2,16$ m....	32
Tabela 12 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 2,16$ m....	32
Tabela 13 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 4,85$ m....	33
Tabela 14 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 4,85$ m....	33

Tabela 15 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 4,85$ m....	34
Tabela 16 - Valores comparativos da relação V_u/V_t no dimensionamento horizontal do tanque modelo 1 com aumento percentual teórico 'p' de 15%....	34
Tabela 17 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 3,18$ m.....	35
Tabela 18 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 3,18$ m.....	36
Tabela 19 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 3,18$ m.....	36
Tabela 20 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 3,18$ m.....	37
Tabela 21 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 6,0$ m.....	37
Tabela 22 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 6,0$ m.....	38
Tabela 23 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 6,0$ m.....	38
Tabela 24 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no dimensionamento vertical do tanque modelo 2 com aumento percentual teórico 'p' de 35%.....	39
Tabela 25 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 3,18$ m....	40
Tabela 26 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 3,18$ m....	40
Tabela 27 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 3,18$ m....	41
Tabela 28 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 3,18$ m....	41
Tabela 29 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 6,0$ m.....	42

Tabela 30 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 6,0$ m.....	42
Tabela 31 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 6,0$ m.....	43
Tabela 32 - Valores comparativos da relação V_u/V_t no dimensionamento horizontal do tanque modelo 2 com aumento percentual teórico 'p' de 35%....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração de um sistema de bombeamento com tanque de escorva cilíndrico em posição vertical.....	5
Figura 2. Modelo ilustrativo de tanque de escorva horizontal.....	7
Figura 3. Material de dimensionamento de “Balão Auto-amorçador”. (Dr. Demócrito de Souza Faria).....	8
Figura 4. Esquema de modelagem para o tanque de escorva em modelo cilíndrico vertical.....	9
Figura 5. Esquema de ilustração dos parâmetros para determinação de Hs em tanques cilíndricos em posição vertical.....	16
Figura 6. Ábaco de Fair-Whipple-Hsiao para tubulações de cobre e plástico..	17
Figura 7. Esquema de modelagem para o tanque de escorva vertical simplificado.....	19
Figura 8. Esquema do tanque cilíndrico horizontal com $V_I = V_m = 0$	20
Figura 9. Esquema do tanque de escorva – modelo 1.....	22
Figura 10. Esquema do tanque de escorva - modelo 2.....	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CILÍNDRICO VERTICAL.....	8
3.2 VOLUMES DO TANQUE DE ESCORVA VERTICAL.....	9
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O TANQUE VERTICAL.....	10
3.3.1 Dedução da Fórmula de Dimensionamento do Diâmetro do Tanque Vertical, por Altura Pré-Definida.....	13
3.4 DETERMINAÇÃO DO HS MÁXIMO LIMITANTE DO TANQUE.....	14
3.4.1 Análise de 'Hs' do Sistema por Altura Pré-determinada.....	16
3.5 METODOLOGIA PARA O AUMENTO PERCENTUAL DA RELAÇÃO '(VL + VU)/(VL + VT)'.....	18
3.6 TANQUE VERTICAL SIMPLIFICADO.....	19
3.7 DIMENSIONAMENTO DE TANQUE CILÍNDRICO HORIZONTAL: ANÁLISE SIMPLIFICADA.....	20
3.8 VERIFICAÇÃO DA PROPOSTA POR ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA.....	22
4. RESULTADOS.....	25
4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO VERTICAL: TANQUE MODELO 1.....	25
4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO HORIZONTAL: TANQUE MODELO 1.....	30
4.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO VERTICAL: TANQUE MODELO 2.....	35
4.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO HORIZONTAL: TANQUE MODELO 2.....	39
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	45
7. REFERÊNCIAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a maioria das atividades humanas, e seu transporte eficiente é fundamental para o desenvolvimento sustentável. A condução da água requer sistemas que demandam energia, como elétrica, potencial ou gravitacional, e a seleção da fonte de energia adequada é crucial para garantir a eficiência e a sustentabilidade do sistema (Dal *et al.*, 2016).

Em diversas circunstâncias relacionadas ao fornecimento de água, é imperativo realizar seu bombeamento para fins de elevação ou recalque. Este tema - instalações de bombeamento - tem adquirido crescente relevância tanto no contexto industrial quanto nos meios urbano e rural. A agricultura brasileira, em particular, tem experimentado um significativo crescimento no contingente de áreas irrigadas no país, tendo em vista o grande número de projetos de irrigação que demonstram avanços tecnológicos através da utilização de equipamentos mais sofisticados. Diante dessa nova perspectiva, torna-se de caráter imprescindível a análise de alternativas e soluções simplificadas que possam proporcionar alta confiabilidade, além de redução nos custos de energia e manutenção.

De acordo com Macintyre (1997), as chamadas bombas hidráulicas podem ser definidas como máquinas hidráulicas geratrizes que transferem energia ao fluido para promover seu deslocamento, essas que basicamente se dividem em dois grandes grupos: bombas volumétricas e turbobombas. As turbobombas, em particular, funcionam através da ação centrífuga de seus rotores, que expelindo o fluido para a saída da carcaça, geram uma redução de pressão em seu interior. Entretanto, para que o fluxo se estabeleça, é necessário que a tubulação de sucção e a carcaça da bomba estejam preenchidas com o fluido que se pretende bombear (escorvadas), possibilitando a ação da pressão atmosférica que atua na superfície livre do reservatório de captação.

Segundo Vilela *et al.* (2003), esse tipo de bomba pode ser instalada tanto abaixo do nível de água do reservatório de sucção (sucção negativa) quanto acima dele (sucção positiva). Quando a bomba é instalada abaixo do nível do reservatório, a tubulação de sucção permanece constantemente preenchida com o fluido, o que constitui uma vantagem significativa. No entanto, essa configuração apresenta desvantagens, como o excesso de umidade, maior dificuldade de instalação e manutenção, e o risco de entupimento. Por essas

razões, na maioria dos sistemas de recalque, opta-se por instalar o conjunto de bombeamento acima do nível da água do reservatório de sucção. Nesta configuração, a maioria dos modelos de turbobombas requer a escorva tanto da carcaça quanto da tubulação de sucção, ou seja, essas partes devem ser totalmente preenchidas com o fluido a ser bombeado.

De acordo com Mattos e Falco (1998), há pelo menos quatro métodos para realizar o processo de escorva de uma bomba: o uso de uma válvula de pé, um tanque de escorva, um ejedor ou uma bomba de vácuo. Como mencionado anteriormente, esses métodos são empregados quando o reservatório de sucção da bomba está localizado abaixo da linha central da bomba. Por outro lado, Macintyre (1997) observa que os defeitos mais comuns nas turbobombas estão relacionados à sucção, ressaltando a importância de atenção especial a essa parte da instalação. Segundo Villa Nova *et al.* (1997), em sistemas de recalque, é comum utilizar a válvula de pé tradicional, que frequentemente requer limpezas periódicas. Como alternativa, os autores sugerem o uso de um "balão de escorva".

Os balões (ou tanques) de escorva são tipicamente cilíndricos ou ovais e podem ser instalados tanto na posição vertical quanto horizontal. Este equipamento apresenta facilidade de construção e instalação, não possui partes móveis, e seu custo de aquisição é comparável ao da válvula de pé. No entanto, são mais pesados e ocupam mais espaço que as válvulas de pé, requerendo estruturas adicionais para instalação. Além disso, há limitações quanto à disponibilidade comercial, conhecimento técnico e informações sobre seu uso.

Em seus estudos, Bettini *et al.* (2008) demonstraram a aplicabilidade da Lei de Boyle no dimensionamento de tanques de escorva, ressaltando a importância da inclusão de um coeficiente de correção específico de acordo com o modelo de montagem do sistema. A escolha do coeficiente de correção adequado depende das características específicas do sistema de escorva, como o tipo de fluido, o modelo do tanque e as condições de operação.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar uma modelagem para o dimensionamento de tanques de escorva, fundamentada teoricamente na

relação derivada da Lei de Boyle (Çenge e Boles, 2013), conforme proposto por Villa Nova *et al.* (1997). Entretanto, considerando as perdas de carga localizadas ao cálculo, além de um coeficiente de correção a ser adotado de acordo com o modelo do tanque, tomando como referência os resultados obtidos pela verificação experimental de Bettini et al. (2008).

Além disso, será proposto um modelo simplificado de dimensionamento para tanques cilíndricos alocados na posição horizontal, como sugere Bettini et al. (2008), que afirma que a configuração mais adequada para tanques de escorva é a horizontal, com o tanque posicionado paralelamente à tubulação de sucção. Essa disposição minimiza o comprimento e o volume da tubulação de sucção, de forma que o volume útil do tanque será otimizado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Mattos & Falco (1998) propõem um método de dimensionamento prático para tanques de escorva, recomendando que estes tenham entre duas a três vezes o volume da tubulação de sucção. No entanto, nesse tipo de metodologia de dimensionamento, falhas operacionais têm sido observadas em tanques que não conseguem realizar a escorva corretamente, resultando até mesmo no colapso do tanque devido à falta de resistência ao vácuo (Bettini et al., 2008).

É fundamental verificar os aspectos de dimensionamento do ponto de vista físico e geométrico, uma vez que o simples dimensionamento com base no volume pode não ser suficiente. Dado que os tanques podem variar amplamente em dimensões e posicionamento espacial, mantendo o mesmo volume interno. Desta forma, torna-se essencial considerar proporções e formatos adequados para o dimensionamento dos tanques de escorva garantindo o funcionamento adequado do sistema.

Franceschini Zinani e Adamy (2018) conduziram um estudo para avaliar e modelar matematicamente o sistema de escorva de uma bomba centrífuga utilizada para o transporte de óleo em um sistema de segurança de uma indústria petroquímica à partir de um tanque de armazenamento até a linha de produção. O sistema com válvula de pé, frequentemente obstruído com o tempo de

funcionamento, foi substituído pela implementação de um sistema com tanque de escorva a montante.

Os autores desenvolveram o tanque baseando-se no modelo de dimensionamento proposto por Mattos e Falco (1998). Entretanto, utilizaram-se da proporção dada pela Lei de Boyle, experimentada por Bettini et al. (2008), para confirmação e adequação do dimensionamento. A eficiência do sistema para a escorva de bombas de óleo em um sistema de segurança de uma indústria petroquímica foi demonstrada pela redução significativa na necessidade de manutenção após um ano da modificação, comparada às cinco intervenções anuais exigidas anteriormente pela válvula de pé. Ou seja, de maneira geral, os tanques de escorva oferecem maior garantia de operação do que as válvulas-de-pé, desde que dimensionados e instalados adequadamente.

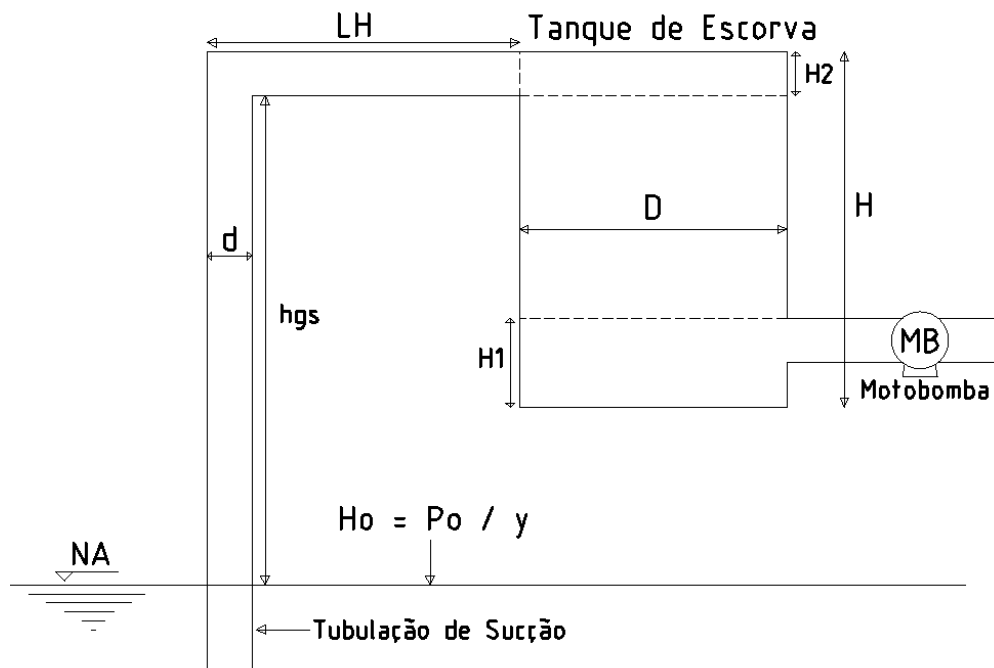
Segundo Sissom & Pitts (1988), todos os gases demonstram comportamento de gás perfeito sob baixas pressões (até 1 atmosfera). A equação do gás perfeito oferece resultados satisfatórios quando a densidade do gás é cerca de mil vezes menor que a densidade do líquido correspondente. Portanto, em sistemas que envolvem água, ar ou vapor d'água, como é o caso de instalações de bombeamento de água, com densidades aproximadas de 998 kg/m³, 1,22 kg/m³ e 0,8 kg/m³, respectivamente, pode-se aplicar a Lei de Boyle para o processo de escorvamento de bombas.

A Lei de Boyle, derivada da lei geral dos gases perfeitos, $(P_1 \cdot V_1)/T_1 = (P_2 \cdot V_2)/T_2$, onde P_1 e P_2 são as pressões inicial e final, V_1 e V_2 são os volumes inicial e final, e T_1 e T_2 são as temperaturas inicial e final, respectivamente, é aplicável a uma transformação isotérmica, na qual a temperatura permanece constante. Nesse caso, a relação entre pressão e volume é inversamente proporcional, simplificando-se para $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$. Segundo Ramalho Júnior et al. (1996), essa relação é representada graficamente por uma curva hipérbole equilátera.

Villa Nova *et al.* (1997) propõem um método de dimensionamento direto, deduzido a partir da análise física e matemática da Lei de Boyle, para tanques de formato cilíndrico alocados em posição vertical (Figura 1) em função dos

parâmetros adotados para o sistema de sucção, dado pela equação (eq. 1) a seguir:

Figura 1. Ilustração de um sistema de bombeamento com tanque de escorva cilíndrico em posição vertical.



Fonte: Adaptado de Villa Nova et al. (1997).

$$D = d * \sqrt{\frac{(LH + hgs)}{\frac{(H - H_1) * (H_0 - hgs - (LH + hgs) * J)}{H_0} - H_2}} \quad (1)$$

Onde:

D: Diâmetro do tanque de escorva (m);

d: Diâmetro da tubulação de sucção (m);

LH: Distância horizontal entre o tanque de escorva e o ponto de sucção (m);

hgs: Distância vertical entre o nível da água no ponto de sucção e a superfície livre da água no tanque de escorva (m);

H: Altura do tanque de escorva (m);

H0: Altura da coluna de água (m) equivalente à pressão atmosférica local (P_0 , N/m²);

H1: Altura mínima do nível de água no tanque de escorva (m);

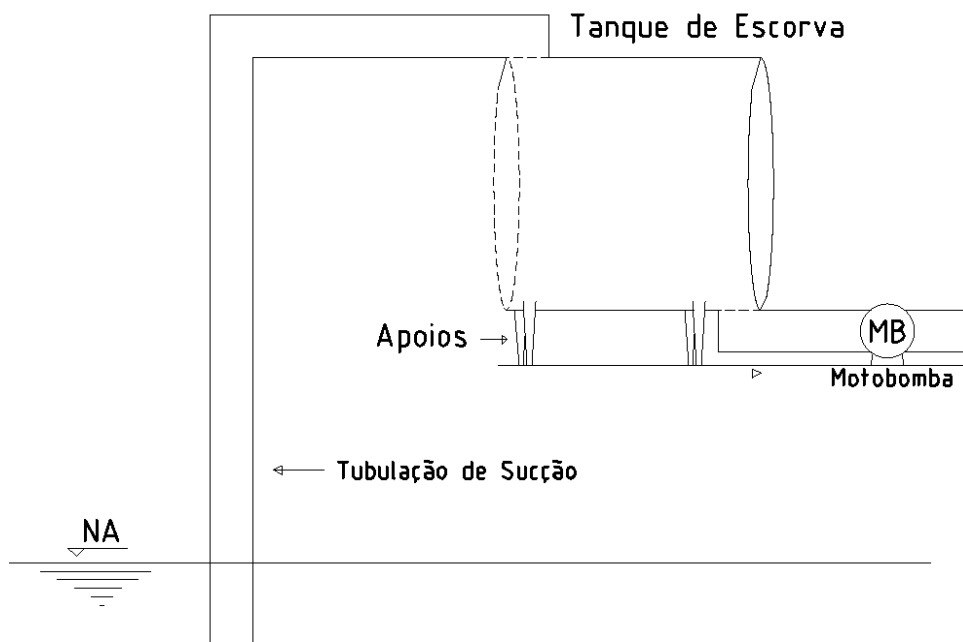
H2: Altura do volume livre no tanque de escorva (m);

J: Perda de carga unitária na tubulação de sucção (m/m).

O modelo de dimensionamento proposto por Villa Nova *et al.* (1997), embora baseado na Lei de Boyle, não a contempla em sua totalidade. Visto que, a fórmula proposta não considera em seu cálculo as perdas de carga localizadas, associadas às peças auxiliares de conexão, como a curva em 90° e a conexão entre a tubulação de sucção e o tanque de escorva, por exemplo. Além disso, Bettini et al. (2008) verificou em seu trabalho que há diferenças significativas na aplicação prática da Lei de Boyle, induzindo a necessidade de um ajuste de correção.

A literatura também indica que, a adoção de tanques de escorva com configuração cilíndrica horizontal, conforme ilustrado na Figura 2, é justificada pela sua disposição paralela ao plano horizontal, a qual proporciona a minimização do comprimento e do volume da tubulação, resultando na redução do volume útil necessário do tanque (Bettini et al., 2008).

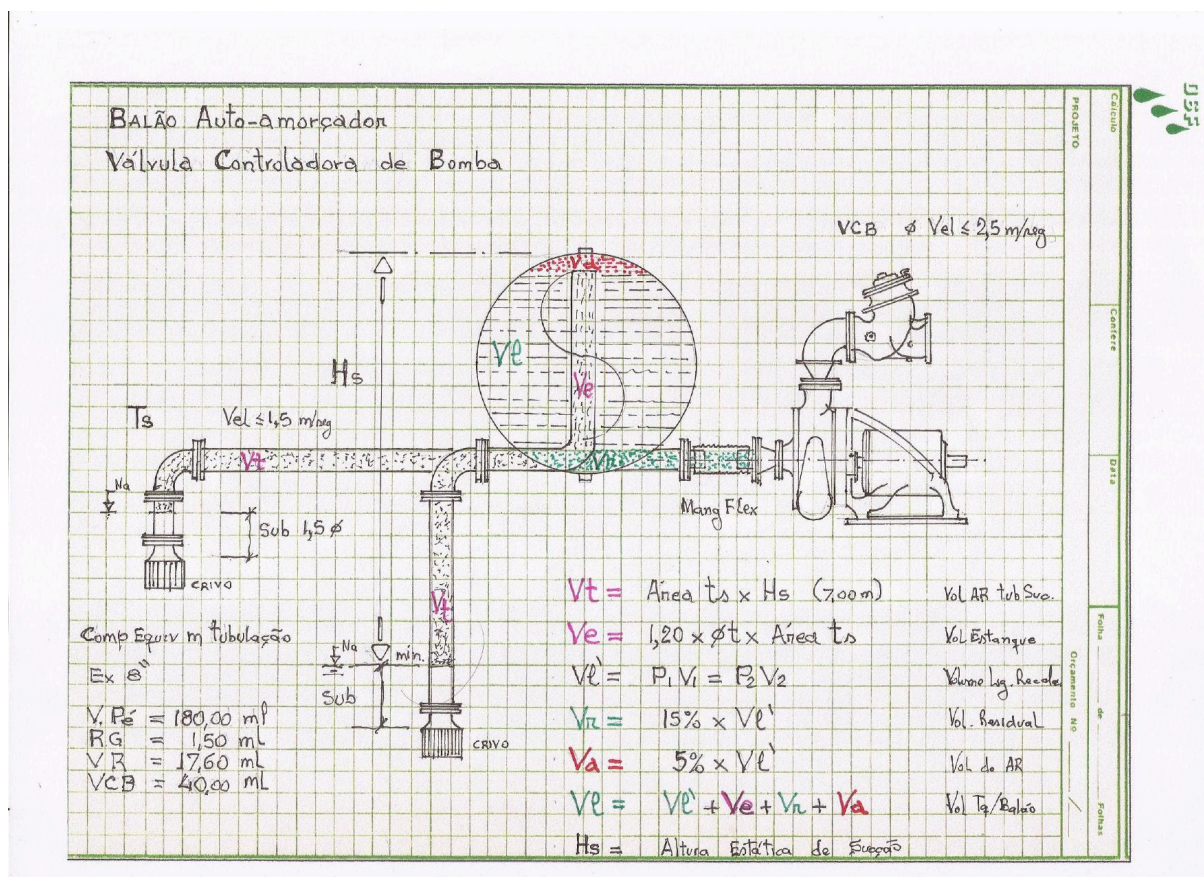
Figura 2. Modelo ilustrativo de tanque de escorva horizontal.



Fonte: Autor (2025).

A análise do material elaborado pelo Dr. Demócrito de Souza Faria (Figura 3), utilizado como base para o dimensionamento de um "balão auto-amorçador" (balão de escorva) disposto horizontalmente, revela que a metodologia de dimensionamento empregada se fundamenta, em parte, na Lei de Boyle. Contudo, observa-se a adoção de percentuais de volume hipotéticos, correspondentes a 5% e 15% para os volumes livre (VI) e residual (Vr) – também denominado volume morto –, respectivamente, em conformidade com a configuração de montagem do tanque.

Figura 3. Material de dimensionamento de “Balão Auto-amorçador”. (Dr. Demócrito de Souza Faria)



Fonte: Autor (2025).

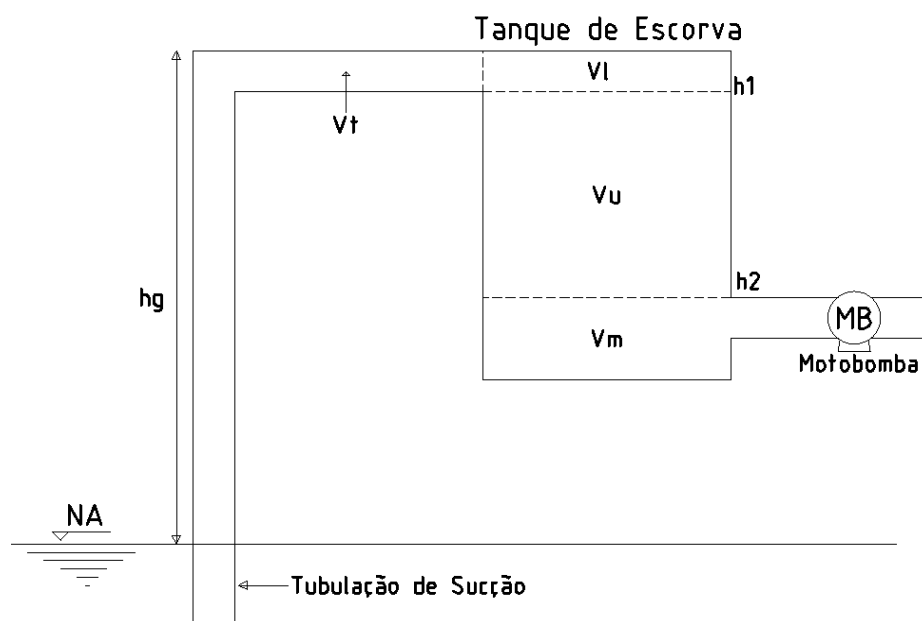
3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, apresenta-se o memorial de cálculo detalhado para o dimensionamento de tanques de escorva considerando uma correção percentual na relação final da Lei de Boyle, abrangendo o caso geral e simplificado para tanques cilíndricos em posição vertical e um caso simplificado de dimensionamento para tanques de escorva cilíndricos em posição horizontal.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO CILÍNDRICO VERTICAL

Na Figura 4 encontra-se esquematicamente um sistema de bombeamento com tanque de escorva cilíndrico em posição vertical, atuando como um reservatório secundário fechado, estrategicamente posicionado próximo à bomba e conectado à entrada de aspiração.

Figura 4. Esquema de modelagem para o tanque de escorva em modelo cilíndrico vertical.



Fonte: Autor (2025).

Na situação inicial, o tanque de escorva é preenchido com líquido até a cota 'h1', a partir do nível de referência. Após o acionamento da bomba, o nível de água dentro do tanque é reduzido até a cota 'h2'. A diminuição do volume de líquido no tanque acarreta um aumento no volume do gás presente na tubulação de sucção. Consequentemente, ocorre uma diminuição da pressão no sistema a temperatura constante, induzindo a ascensão da água da fonte de abastecimento pela tubulação de sucção.

É imperativo que essa redução de pressão seja suficiente para impulsionar o líquido da fonte de abastecimento, superando tanto a altura geométrica quanto as perdas de carga ao longo da tubulação de sucção. Dessa forma, garante-se que todo o volume de água aspirado pela bomba seja devidamente repostado, assegurando a continuidade do processo de bombeamento.

3.2 VOLUMES DO TANQUE DE ESCORVA VERTICAL

Adotando como referência as nomenclaturas propostas por Bettini (2007), os diferentes volumes dentro do tanque de escorva são definidos da seguinte forma:

1. Volume livre (V_l): Corresponde à porção superior do tanque que permanece desocupada por líquido.
2. Volume útil (V_u): Representa a porção do tanque que será preenchida por ar durante o funcionamento do sistema.
3. Volume morto (V_m): Refere-se ao volume situado abaixo do nível da linha de sucção da bomba, que deve ser constantemente preenchido com líquido para garantir o correto funcionamento do sistema.
4. Volume da tubulação de sucção (V_t): Corresponde ao volume da tubulação que, inicialmente preenchida com ar, passa a ser preenchida com líquido durante a operação da bomba.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O TANQUE VERTICAL

Com base nestas definições e partindo da Lei de Boyle (Çengel e Boles, 2013), é possível estabelecer relações matemáticas que descrevem o comportamento do sistema. A Lei de Boyle, em sua essência, permite analisar as variações de pressão e volume do gás presente no tanque de escorva e na tubulação de sucção durante o processo de bombeamento, estabelecendo que: para uma dada massa de gás a temperatura constante, o produto da pressão pelo volume é constante.

Com base nesta análise, foram determinadas as dimensões necessárias do tanque de escorva, levando em consideração as características da bomba, da tubulação e da fonte de abastecimento, de modo a garantir o bom desempenho do sistema de bombeamento e evitar problemas como a cavitação ou insuficiência volumétrica do tanque.

Equação Fundamental

Da a Lei de Boyle (eq. 2), tem-se:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (2)$$

Onde:

P_1 = Pressão do gás antes do sistema ser ligado;

V_1 = Volume do gás antes do sistema ser ligado;

P_2 = Pressão do gás depois do sistema ser ligado;

V_2 = Volume do gás depois do sistema ser ligado.

De acordo com esquema apresentado na Figura 4, define-se os seguintes parâmetros:

P_1 : Pressão do gás, em m.c.a, antes do sistema ser ligado, considerada como a pressão atmosférica local (P_0) dividida pelo peso específico do fluido succionado (γ):

$$P_1 = P_0/\gamma \quad (3)$$

V_1 : Volume do gás antes do sistema ser ligado, correspondente à soma do volume da tubulação de sucção (V_t) e o volume livre do tanque (V_l):

$$V_1 = V_t + V_l \quad (4)$$

H_s : Corresponde à altura manométrica de sucção, dada pela soma do desnível geométrico de sucção (h_{gs}) e da perda de carga total na tubulação de sucção (h_f):

$$H_s = h_{gs} + h_f \quad (5)$$

P_2 : Pressão do gás depois do sistema ser ligado, é obtida pela aplicação da Lei da conservação da energia entre o nível da água no reservatório de sucção e a entrada do tanque de escorva. O que resulta em P_2 dado em função da diferença entre a pressão atmosférica local (P_0) e da altura manométrica de sucção (H_s):

$$P_2 = (P_0/\gamma - h_{gs} - h_f) \quad (6)$$

$$\Rightarrow P_2 = P_1 - (h_{gs} + h_f) \quad (7)$$

$$\Rightarrow P_2 = P_1 - Hs \quad (8)$$

V_2 : Volume do gás depois do sistema ser ligado, correspondente à soma do volume livre do tanque (Vl) e o volume útil do tanque (Vu):

$$V_2 = Vl + Vu \quad (9)$$

Substituindo as equações (eq. 3), (eq. 4), (eq. 8) e (eq. 9) na equação fundamental (eq. 2), obtemos:

$$P_1 \cdot (Vt + Vl) = (P_1 - Hs) \cdot (Vl + Vu) \quad (10)$$

Rearranjando a expressão, temos a relação resultante da Lei de Boyle (eq. 11):

$$\frac{(Vl+Vu)}{(Vt+Vl)} = \frac{P_1}{(P_1-Hs)} \quad (11)$$

Relação entre Volume e Dimensões do Tanque Vertical

Considerando que o tanque possui formato cilíndrico vertical (Figura 4), seu volume total (Vol) pode ser expresso em função do diâmetro (D) e da altura (h):

$$Vol = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h \quad (12)$$

O volume total do tanque também pode ser expresso como a soma dos volumes livre (Vl), útil (Vu) e morto (Vm):

$$Vol = Vl + Vu + Vm \quad (13)$$

Além disso, sendo 'LH' o valor da distância horizontal do tanque ao ponto de captação e, 'd' o valor do diâmetro da tubulação de sucção, tem-se o volume da tubulação de sucção (Vt):

$$Vt = \frac{\pi d^2}{4} \cdot (hg + LH) \quad (14)$$

3.3.1 Dedução da Fórmula de Dimensionamento do Diâmetro do Tanque Vertical, por Altura Pré-Definida

Em uma análise prática, o volume da tubulação de sucção (V_t), a altura do volume livre (h_l) e a altura do volume morto (h_m) podem ser considerados constantes, simplificando o dimensionamento do tanque de escorva. As alturas ' h_l ' e ' h_m ', que representam, respectivamente, a porção superior não ocupada por líquido e a porção inferior constantemente preenchida por líquido, podem ser pré-determinadas com base no diâmetro da tubulação de sucção e na altura da câmara do rotor da bomba, levando em consideração os critérios do projeto.

A partir da equação (11) adiciona-se ($V_m - V_m$) ao termo ($V_l + V_u$) sem perda de valor lógico e obtém-se a equação (15):

$$\frac{(V_l + V_u + V_m - V_m)}{(V_t + V_l)} = \frac{P_1}{(P_1 - H_s)} \quad (15)$$

Sabendo que, $Vol = V_l + V_u + V_m$ (eq. 13), tem-se:

$$\frac{(Vol - V_m)}{(V_t + V_l)} = \frac{P_1}{(P_1 - H_s)} \quad (16)$$

Ao substituir as expressões de ' V_l ' e ' V_m ' em função de ' h_l ', ' h_m ' e do diâmetro (D) do tanque na equação (16), é possível obter uma nova equação (eq. 17) que relaciona o diâmetro do tanque com o diâmetro da tubulação de sucção e a altura pré-definida.

$$\frac{(\frac{\pi D^2}{4} \cdot h - \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_m)}{(\frac{\pi d^2}{4} \cdot (h_g + LH) + \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_l)} = \frac{P_1}{(P_1 - H_s)} \quad (17)$$

Simplificando ' $\frac{\pi}{4}$ ' em todos os termos do lado esquerdo da equação, temos uma sequência de simplificação a partir da eq. 18:

$$\frac{D^2(h - h_m)}{d^2 \cdot (h_g + LH) + D^2 \cdot h_l} = \frac{P_1}{(P_1 - H_s)} \quad (18)$$

Com algumas simplificações obtém-se o diâmetro do tanque (D) como variável de interesse:

$$D^2 = \frac{P_1 \cdot d^2 \cdot (hg + LH)}{(h - h_m) \cdot (P_1 - Hs) - P_1 \cdot h_l} \quad (19)$$

$$\Rightarrow D = d * \sqrt{\frac{P_1 \cdot (hg + LH)}{(h - h_m) \cdot (P_1 - Hs) - P_1 \cdot h_l}} \quad (20)$$

Simplificando P_1 :

$$D = d * \sqrt{\frac{(hg + LH)}{\frac{(h - h_m) \cdot (P_1 - Hs)}{P_1} - h_l}} \quad (21)$$

A fórmula obtida (eq. 21) expressa teoricamente o dimensionamento baseado apenas na proporção dada pela Lei de Boyle (eq. 2), assim como a fórmula proposta por Villa Nova (1997) (eq. 1), diferenciando-se apenas no cálculo de 'Hs'. Por outro lado, Bettini et al. (2008) verificou em seu experimento que há diferenças percentuais significativas na relação final '(VI+Vu)/(VI+Vt)' prevista pela Lei de Boyle e a experimentação de acordo com o modelo de tanque.

Desta forma, conduziu-se um estudo sobre a altura manométrica de sucção (Hs) de forma a obter a uma correção que resulte em um aumento percentual pré-definido para a relação final '(VI+Vu)/(VI+Vt)' considerando a influência direta verificada anteriormente pela equação 11.

3.4 DETERMINAÇÃO DO HS MÁXIMO LIMITANTE DO TANQUE

A altura manométrica de sucção (Hs), exerce uma influência significativa no dimensionamento do sistema, abrangendo tanto o desnível geométrico de sucção (hgs) quanto a perda de carga total (hf) na tubulação. Essa interdependência possibilita a utilização dos conceitos de NPSH (Net Positive Suction Head) para estabelecer um limite máximo para Hs, assegurando que o dimensionamento seja adequado e não ocorra cavitação, de tal modo que o NPSHd - disponível - seja

suficiente quando comparado ao NPSHr - requerido pela bomba - fornecido pelos fabricantes.

De forma prática, dadas as informações, torna-se possível determinar um valor máximo limitante para o dimensionamento do tanque. Segue a dedução a partir da equação que é utilizada para o teste condicional do NPSH (FURTADO, 2019).

Calcula-se inicialmente o NPSHd - disponível -, que diz respeito à altura de pressão de aspiração disponível na instalação onde a bomba se encontra (eq. 22):

$$NPSHd = \frac{P_0 - P_v}{\gamma} - (h_{gs} + h_f) \quad (22)$$

Para que não ocorra cavitação no sistema de sucção, deve-se obedecer a seguinte condição imposta pelo valor do NPSHr - requerido -, fornecido pelos fabricantes:

$$NPSHd > NPSHr + F_s \quad (23)$$

$$\Rightarrow \frac{P_0 - P_v}{\gamma} - (h_{gs} + h_f) > NPSHr + F_s \quad (24)$$

Onde:

NPSHd = NPSH disponível;

NPSHr = NPSH requerido (fornecido pelo fabricante da bomba);

P_0 = Pressão atmosférica local;

P_v = Pressão de vapor da água;

γ = Peso específico do fluido;

F_s = Fator de segurança, dado entre 0,6 m e 1,2 m.

A inequação 24, pode ser reescrita:

$$\frac{P_0 - P_v}{\gamma} - H_s > NPSHr + F_s \quad (25)$$

Isolando H_s e invertendo os sinais da inequação, determina-se o valor máximo de H_s , para que não ocorra cavitação.

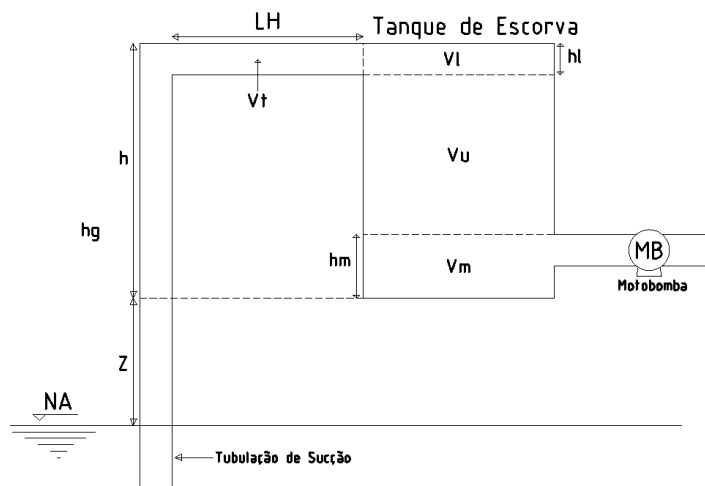
$$H_s < \frac{P_0 - P_v}{\gamma} - NPSHr - F_s \quad (26)$$

Cabe lembrar que é preferível a utilização de tanques com menores alturas, atentando-se ao fato de que o valor da altura do tanque contribui diretamente para o aumento das perdas de carga relacionadas à sucção da bomba e o fenômeno físico da cavitação pode danificar o rotor da bomba, além de problemas de insuficiência na pressurização do sistema (Vasquez e Jacinto, 2024).

3.4.1 Análise de 'Hs' do Sistema por Altura Pré-determinada

O desnível geométrico de sucção (h_g), conforme ilustrado na Figura 5, é determinado pela soma da altura do tanque (h) com a diferença de cotas (Z) entre a base do tanque e o nível da água no reservatório.

Figura 5. Esquema de ilustração dos parâmetros para determinação de H_s em tanques cilíndricos em posição vertical.



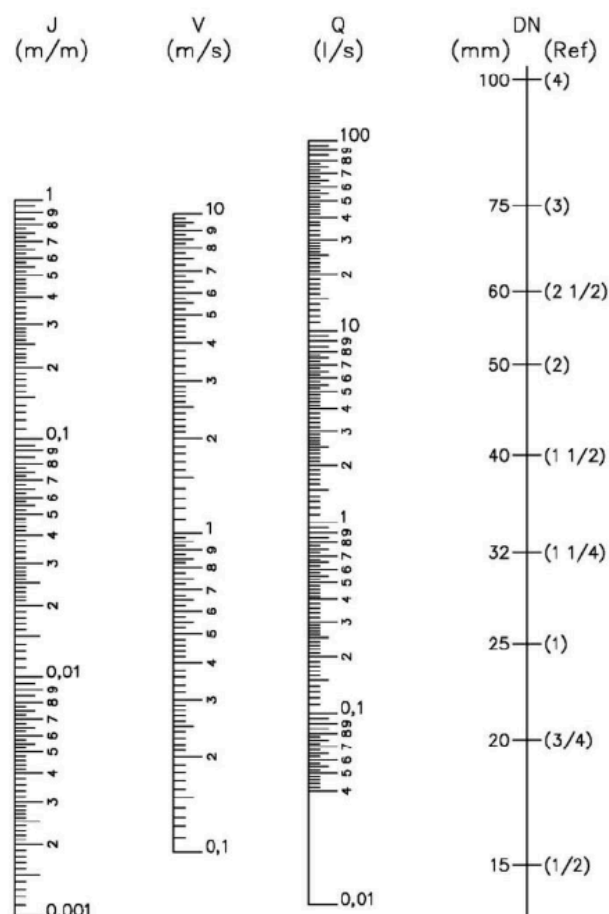
Fonte: Autor (2025).

A perda de carga total (h_f) na tubulação de sucção, por sua vez, pode ser decomposta em duas componentes: a perda de carga contínua, resultante do atrito ao longo de trechos retilíneos da tubulação, e a perda de carga localizada, oriunda de singularidades como conexões e válvulas (Carvalho, 1999).

Considerando que as perdas de carga localizadas podem ser analisadas através do método dos comprimentos equivalentes, basta representar a perda de carga (h_f) como a soma da altura (h) do tanque, a diferença de cotas (Z), distância horizontal do tanque ao ponto de captação (LH) e o comprimento equivalente das perdas de carga localizadas (L_{eq}), para enfim multiplicar o valor total por um coeficiente de perda de carga (J), que pode ser determinado por algum ábaco de perda de carga dado em m/m de acordo com o material, a exemplo, tem-se o ábaco apresentado na Figura 6 utilizado para tubulações de cobre e plástico.

$$h_f = (h + Z + LH + L_{eq}) * J \quad (27)$$

Figura 6. Ábaco de Fair-Whipple-Hsiao para tubulações de cobre e plástico.



Fonte: Carvalho (2013).

3.5 METODOLOGIA PARA O AUMENTO PERCENTUAL DA RELAÇÃO '(VL + VU)/(VL + VT)'

Para impor um aumento percentual na relação '(VI + Vu)/(VI + Vt)' dada pela Lei de Boyle, basta analisar a eq. 11 como uma função real que depende da variável 'Hs'. Desta forma, deduz-se o ajuste necessário à equação para que haja um aumento percentual 'p' determinado.

Tomando a relação '(VI+Vu)/(VI+Vt)' como 'y', temos:

$$y = \frac{P_1}{P_1 - H_s} \quad (28)$$

Sendo y' o valor final da relação '(VI+Vu)/(VI+Vt)' após o aumento percentual 'p' determinado em 'y', temos:

$$y' = (1 + p) * y \quad (29)$$

$$\Rightarrow \frac{P_1}{P_1 - H_{s'}} = (1 + p) * \frac{P_1}{P_1 - H_s} \quad (30)$$

Isolando Hs' em função de Hs:

$$H_{s'} = \frac{H_s - P_1}{(1+p)} + P_1 \quad (31)$$

Onde:

Hs' = Altura manométrica de sucção corrigida;

Hs = Altura manométrica de sucção;

P₁ = Pressão atmosférica;

p = Aumento percentual em decimal.

Desta forma, calcula-se a altura manométrica de sucção ajustada (Hs') pela equação seguinte (eq. 32), levando em conta o cálculo de 'Hs' dado pela eq. 5 e 'hf' pela eq. 27.

$$Hs' = \frac{[hg + (h+Z+LH+L)^*] - P_1}{(1+p)} + P_1 \quad (32)$$

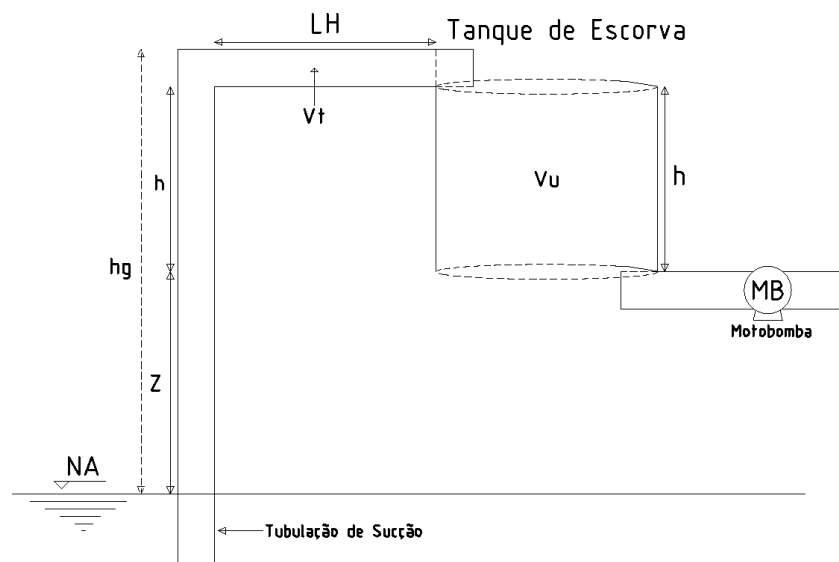
O aumento percentual 'p' que deve ser aplicado dependerá do modelo de montagem do tanque, de acordo com a diferença percentual avaliada experimentalmente.

3.6 TANQUE VERTICAL SIMPLIFICADO

Na caso particular de dimensionamento de tanque de escorva, em posição vertical, onde 'hl' e 'hm' são iguais a zero, o cálculo para determinação das dimensões do tanque é simplificado, permitindo aproveitamento máximo do volume. Desta forma, elimina-se a necessidade dos volumes livre (Vl) e morto (Vm), como ilustrado na Figura 10.

Este modelo de construção de tanque apresenta algumas vantagens, como a utilização integral do volume do tanque como volume útil (Vu), redução do custo de material e a redução do acúmulo de resíduos no fundo do tanque por decantação.

Figura 7. Esquema de modelagem para o tanque de escorva vertical simplificado.



Fonte: Autor (2025).

Neste caso particular de modelagem, a eq. 21 é simplificada resultando na seguinte expressão (eq. 38):

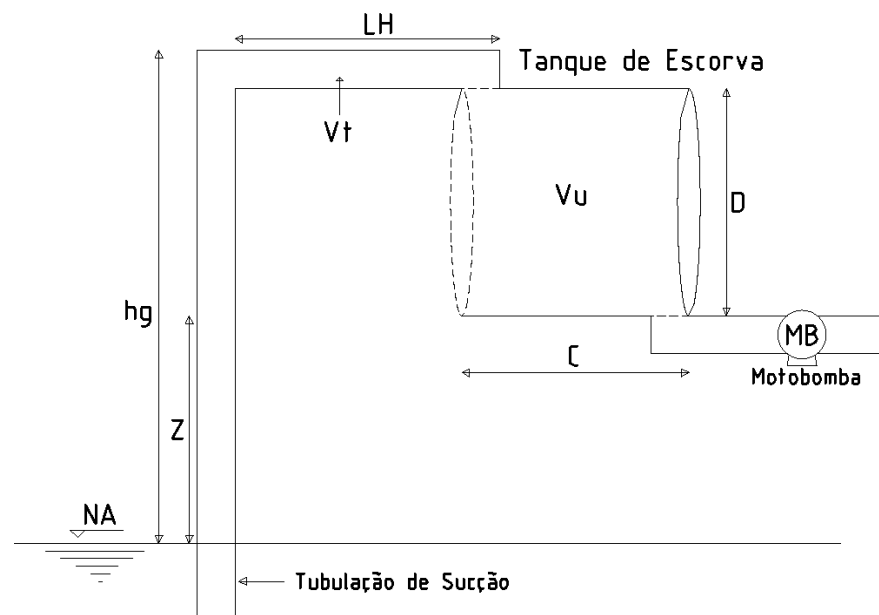
$$D = d * \sqrt{\frac{(hg+LH)}{\frac{h * (P_1 - Hs)}{P_1}}} \quad (33)$$

Esta equação permite calcular o diâmetro do tanque de diretamente, desde que a altura seja previamente definida, otimizando o volume do tanque.

3.7 DIMENSIONAMENTO DE TANQUE CILÍNDRICO HORIZONTAL: ANÁLISE SIMPLIFICADA

Nesta seção, explora-se a metodologia de dimensionamento de tanques cilíndricos alocados na posição horizontal, com foco no caso simplificado onde $Vl = Vm = 0$, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 8. Esquema do tanque cilíndrico horizontal com $Vl = Vm = 0$.



Fonte: Autor (2025).

A metodologia de dimensionamento para tanques cilíndricos alocados na posição horizontal é análoga à metodologia utilizada para o dimensionamento de tanques na posição vertical, divergindo apenas na maneira em que o volume é expresso.

Enquanto em tanques verticais o volume é dado em função do diâmetro e da altura, nos tanques horizontais o volume é dado em função do diâmetro (D) e o comprimento (C) do tanque.

Esta sutil diferença implica na mudança de variável de interesse, de tal forma que, neste caso, busca-se determinar o comprimento do tanque (C) em função do diâmetro pré-determinado (D), respeitando o limite máximo estabelecido pela relação de NPSH (eq.23).

Considerando o caso simplificado onde $Vl = Vm = 0$, a equação que relaciona os parâmetros do tanque horizontal é (eq. 34):

$$\frac{Vol}{Vt} = \frac{P_1}{(P_1 - Hs)} \quad (34)$$

$$\Rightarrow \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} * C}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} * (hg + LH)} = \frac{P_1}{(P_1 - Hs)} \quad (35)$$

Simplificando $\pi/4$, temos:

$$\frac{D^2 * C}{d^2 * (hg + LH)} = \frac{P_1}{(P_1 - Hs)} \quad (36)$$

Isolando o comprimento do tanque (C), temos:

$$C = \frac{P_1 * d^2 * (hg + LH)}{(P_1 - Hs) * D^2} \quad (37)$$

Onde:

P_1 : Pressão do gás antes do sistema ser ligado;

Hs: Altura manométrica de sucção;

hg: Altura geométrica de sucção;

D: Diâmetro do tanque;

d: Diâmetro da tubulação de sucção;

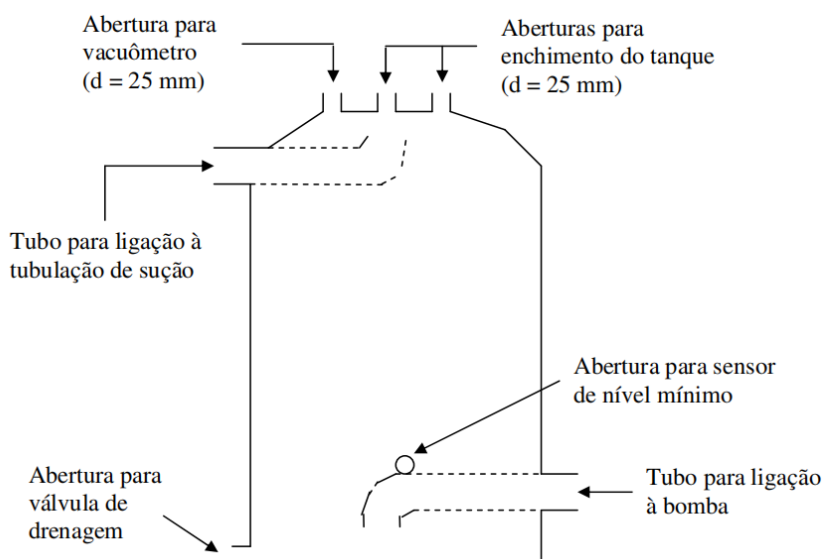
LH: Distância horizontal do ponto de captação;

C: Comprimento do tanque.

3.8 VERIFICAÇÃO DA PROPOSTA POR ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA

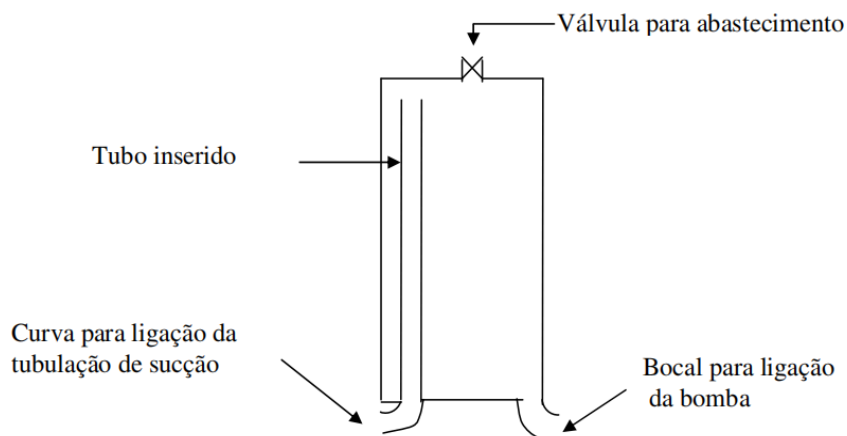
A pesquisa conduzida por Bettini et al. (2008) verificou através de dois modelos experimentais de tanque de escorva (Figuras 12 e 13), submetidos a diferentes condições de perda de carga, a aplicabilidade real da Lei de Boyle para o dimensionamento de tanques de escorva. No trabalho, constatou-se que há diferenças percentuais significativas entre relações de ' $(V_I + V_u) / (V_t + V_I)$ ' previstas pela Lei de Boyle e os resultados aferidos no experimento.

Figura 9. Esquema do tanque de escorva – modelo 1.



Fonte: Bettini et al. (2008).

Figura 10. Esquema do tanque de escorva - modelo 2.



Fonte: Bettini et al. (2008).

Desta forma, propõe-se a utilização dos dados experimentais de Bettini et al. (2008) como base comparativa de dimensionamento, justificada pela riqueza de dados reais aferidos de maneira criteriosa e abrangente em contextos experimentais que simulam o funcionamento real de sistemas de sucção com tanque de escorva.

Ao confrontar os dados obtidos pela experimentação real do sistema e as previsões de dimensionamento determinadas por fórmulas matemáticas, é possível avaliar a precisão e a confiabilidade do modelo matemático.

O experimento de Bettini

O experimento foi realizado no laboratório da UNESP, no campus de Jaboticabal, no estado de São Paulo.

Dados referentes ao ambiente do experimento:

- Altitude = 614 metros
- $P_1 = 9,65$ mca (pressão atmosférica local)
- $T = 25^\circ \text{C}$ (temperatura média da água)
- $P_v = 0,322$ mca (pressão de vapor da água à 25°C)

Condição de trabalho da bomba centrífuga modelo KSB BLOC 32 - 125:

- Vazão = $8 \text{ m}^3/\text{h} = 2,22 \text{ l/s}$
- Rotor de 139 mm
- 4 CV de potência, 3 kW
- 3500 rpm

Dados Referentes ao Tanque Modelo 1:

- Tubulação de sucção em PVC - DN 70 mm (3") - PN 40
- Altura do tanque 0,49 m
- Diâmetro do tanque = 0,46 m
- $V_I = 7,38 \text{ L}$
- $h_{I^*} = 0,0444 \text{ m}$ (Calculado através de V_I)
- $h_{m^*} = 0,14$ (definido com base no diâmetro do rotor da bomba)

*: Calculado de acordo com os dados fornecidos.

Dados Referentes ao Tanque Modelo 2:

- Tubulação de sucção em PVC - DN 50 mm (2") - PN 40
- Altura do tanque 0,80 m
- Diâmetro do tanque = 0,29 m
- $V_I = 6,35 \text{ L}$
- $h_I^* = 0,0962 \text{ m}$ (Calculado através de V_I)
- $h_m^* = 0,14$ (definido com base no diâmetro do rotor da bomba)

*: Calculado de acordo com os dados fornecidos.

Nos experimentos com o tanque modelo 1, foram avaliadas duas distâncias horizontais (LH): 2,16 metros e 4,85 metros. O autor observou que há uma diferença percentual média de 9% na relação $(V_I + V_u)/(V_t + V_I)$ em comparação aos valores previstos pela Lei de Boyle. Para garantir o funcionamento do sistema com margem de segurança, recomenda-se aplicar um aumento percentual de correção superior a 9% em H_s , aplicado conforme a equação 31.

Similarmente, nos experimentos com o tanque modelo 2, foram testadas distâncias horizontais de 3,18 metros e 6 metros. Nestes casos, a diferença percentual média na relação ' $(V_I + V_u)/(V_t + V_I)$ ' foi de 30,6%. Portanto, sugere-se um aumento percentual de correção superior a 30,6% em H_s , aplicado na Equação 31, para assegurar a operação segura do sistema.

4. RESULTADOS

Nesta seção analisa-se a eficácia da correção da altura manométrica de sucção (H_s) em virtude do ajuste percentual da razão ' $(V_I + V_u)/(V_t + V_I)$ ', conforme a equação 31, para dimensionamento de tanques de escorva cilíndricos verticais e horizontais baseados na Lei de Boyle em comparação aos resultados experimentais apresentados por Bettini et al. (2008).

Para garantir suficiência volumétrica e operação segura do sistema, foram aplicados ajustes percentuais de correção (p) de 15% para o tanque modelo 1 e 35% para o tanque modelo 2, em ambas as propostas de dimensionamento vertical e horizontal. Deve-se levar em conta que o estudo de Bettini et al. (2008) analisou a variação de ' H_s ' através da regulação em uma válvula de gaveta instalada na tubulação de sucção, o que normalmente não acontece em uma instalação de bombeamento real. Além disso, os valores obtidos em ambas as

situações determinadas de distâncias horizontais (LH) foram considerados para o cálculo das médias.

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO VERTICAL: TANQUE MODELO 1

Tabela 1 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 2,16$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	V_u (L)	$(V_u+VI)/$ (V_t+VI)	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	V_u (L)	$(V_u+VI)/$ (V_t+VI)
1	1,155	7,38	16,55	1,2	2,26	0,263	2,42	16,63	1,31
	2	7,38	20,15	1,38	3,00	0,280	2,74	18,88	1,45
	3	7,38	25,04	1,63	3,87	0,306	3,27	22,48	1,67
	4	7,38	31,61	1,96	4,74	0,340	4,04	27,78	1,96
	5	7,38	42,45	2,51	5,61	0,389	5,28	36,34	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; V_u – volume útil; V_t – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 2 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 2,16$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
2	2,174	7,38	25,61	1,38	3,15	0,326	3,71	25,56	1,48
	3	7,38	31,89	1,65	3,87	0,351	4,30	29,59	1,67
	4	7,38	39,39	1,96	4,74	0,390	5,31	36,57	1,96
	5	7,38	41,61	2,39	5,61	0,446	6,95	47,85	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 3 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 2,16$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
3	3,18	7,38	38	1,63	4,02	0,398	5,52	38,01	1,72
	4	7,38	46,29	1,93	4,74	0,435	6,59	45,36	1,96
	5	7,38	57,47	2,33	5,61	0,497	8,62	59,35	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 4 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 2,16$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
4	4,091	7,38	53,63	1,92	4,82	0,480	8,04	55,34	2,00
	5	7,38	57,83	2,05	5,61	0,543	10,29	70,85	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; V_u – volume útil; V_t – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 5 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 4,85$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
1	1,16	7,38	31,17	1,26	2,27	0,358	4,48	30,80	1,31
	2	7,38	37,6	1,47	3,00	0,382	5,08	34,95	1,45
	3	7,38	44,97	1,71	3,87	0,416	6,05	41,61	1,67
	4	7,38	54,02	2,01	4,74	0,463	7,47	51,42	1,96
	5	7,38	59,02	2,17	5,61	0,529	9,78	67,28	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; V_u – volume útil; V_t – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 6 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 4,85$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	D (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)
2	2,174	7,38	42,56	1,45	3,15	0,419	6,12	42,09	1,48
	3	7,38	51,28	1,70	3,87	0,451	7,08	48,73	1,67
	4	7,38	57,48	1,88	4,74	0,501	8,75	60,21	1,96
	5	7,38	59,09	1,93	5,61	0,573	11,45	78,79	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 7 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 4,85$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	D (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)
3	3,18	7,38	53,82	1,59	4,02	0,491	8,40	57,83	1,72
	4	7,38	57,84	1,70	4,74	0,536	10,03	69,00	1,96
	5	7,38	57,82	1,69	5,61	0,613	13,12	90,29	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

A partir dos dados relativos às tabelas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, obtém-se a Tabela 8, que relaciona os valores teóricos previstos pela Lei de Boyle com as médias dos valores calculados pelo dimensionamento teórico corrigido em 15%. Desta forma, confirma-se o aumento percentual efetivo verificado ao final do

dimensionamento do tanque vertical modelo 1, dado pela equação 21, com correção de 15% aplicada pela equação 31.

Tabela 8 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no dimensionamento vertical do tanque modelo 1 com aumento percentual teórico 'p' de 15%.

Médias do Dimensionamento Vertical Proposto				
Hs (m)	9,65 (9,65-Hs)	Hs' (m)	(Vu+VI) (Vt+VI)	Aumento Percentual Efetivo (%)
1,158	1,136	2,27	1,307	15,000
2,087	1,276	3,07	1,468	15,015
3,060	1,464	3,92	1,684	15,019
4,013	1,712	4,75	1,969	15,004
5,000	2,075	5,61	2,387	15,000

Hs - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação;
Hs' - altura manométrica de sucção corrigida;

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO HORIZONTAL: TANQUE MODELO 1

Para o dimensionamento horizontal do tanque, um diâmetro de 0,3 m foi pré-estabelecido. Contudo, da análise dos resultados dos testes verificou-se que a proporção final $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ - neste caso simplificada em ' V_u/V_t ' devido a ausência de volume livre (VI) no tanque - permanece inalterada, independentemente do valor adotado inicialmente para o diâmetro, dentro das limitações físicas impostas pela equação 26.

Tabela 9 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 2,16$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	C (m)	V_u (L)	$V_u/$ V_t
1	1,155	7,38	16,55	1,2	2,26	0,22	15,89	1,31
	2	7,38	20,15	1,38	3,00	0,25	17,64	1,45
	3	7,38	25,04	1,63	3,87	0,29	20,29	1,67
	4	7,38	31,61	1,96	4,74	0,34	23,89	1,96
	5	7,38	42,45	2,51	5,61	0,41	29,02	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 10 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 2,16$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	C (m)	V_u (L)	$V_u/$ V_t
2	2,174	7,38	25,61	1,38	3,15	0,34	23,76	1,48
	3	7,38	31,89	1,65	3,87	0,38	26,72	1,67
	4	7,38	39,39	1,96	4,74	0,44	31,45	1,96
	5	7,38	41,61	2,39	5,61	0,54	38,21	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 11 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 2,16$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	C (m)	Vu (L)	$Vu/$ Vt
	3,18	7,38	38	1,63	4,02	0,48	34,06	1,72
3	4	7,38	46,29	1,93	4,74	0,55	39,00	1,96
	5	7,38	57,47	2,33	5,61	0,67	47,39	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 12 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 2,16$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	C (m)	Vu (L)	$Vu/$ Vt
	4,091	7,38	53,63	1,92	4,82	0,67	47,33	2,00
4	5	7,38	57,83	2,05	5,61	0,80	56,58	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 13 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 4,85$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	C (m)	Vu (L)	$Vu/$ Vt
1	1,16	7,38	31,17	1,26	2,27	0,42	29,43	1,31
	2	7,38	37,6	1,47	3,00	0,46	32,66	1,45
	3	7,38	44,97	1,71	3,87	0,53	37,57	1,67
	4	7,38	54,02	2,01	4,74	0,63	44,22	1,96
	5	7,38	59,02	2,17	5,61	0,76	53,73	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI - volume livre; Vu - volume útil; Vt - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 14 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 4,85$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	C (m)	Vu (L)	$Vu/$ Vt
2	2,174	7,38	42,56	1,45	3,15	0,55	39,13	1,48
	3	7,38	51,28	1,70	3,87	0,62	43,99	1,67
	4	7,38	57,48	1,88	4,74	0,73	51,78	1,96
	5	7,38	59,09	1,93	5,61	0,89	62,91	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI - volume livre; Vu - volume útil; Vt - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 15 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 1 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 4,85$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	C (m)	Vu (L)	$Vu/$ Vt
	3,18	7,38	53,82	1,59	4,02	0,73	51,82	1,72
3	4	7,38	57,84	1,70	4,74	0,84	59,34	1,96
	5	7,38	57,82	1,69	5,61	1,02	72,10	2,39

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI - volume livre; Vu - volume útil; Vt - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 16 - Valores comparativos da relação Vu/Vt no dimensionamento horizontal do tanque modelo 1 com aumento percentual teórico 'p' de 15%.

Médias do Dimensionamento Horizontal Proposto				
H_s (m)	9,65 (9,65- H_s)	H_s' (m)	$Vu/$ Vt	Aumento Percentual Efetivo (%)
1,158	1,136	2,27	1,307	15,000
2,087	1,276	3,07	1,468	15,015
3,060	1,464	3,92	1,684	15,019
4,013	1,712	4,75	1,969	15,004
5,000	2,075	5,61	2,387	15,000

H_s - altura manométrica de sucção; VI - volume livre; Vu - volume útil; Vt - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida;

A análise dos dados nas Tabelas 9 a 15, compilados na Tabela 16, confirma a eficácia da equação 31 para o aumento percentual de 15% da relação final Vu/Vt no dimensionamento proposto de tanque horizontal.

4.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO VERTICAL: TANQUE MODELO 2

O ajuste percentual de correção 'p' aplicado para as análises de dimensionamento do tanque modelo 2 foi de 35% para que haja garantia de suficiência volumétrica do tanque instalado no sistema com margem de segurança.

Tabela 17 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 3,18$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	D (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)
1	1,1332	6,35	18,96	1,66	3,34	0,177	2,35	13,80	1,53
	2	6,35	23,86	1,98	3,98	0,189	2,71	15,88	1,70
	3	6,35	30,92	2,44	4,72	0,208	3,28	19,22	1,96
	4	6,35	38,67	2,95	5,46	0,234	4,15	24,35	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 18 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 3,18$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
	2,433	6,35	23,29	1,75	4,30	0,219	3,63	21,28	1,81
2	3	6,35	27,65	2,00	4,72	0,232	4,06	23,82	1,96
	4	6,35	33,78	2,36	5,46	0,261	5,15	30,17	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 19 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 3,18$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
	3,493	6,35	31,22	2,01	5,09	0,268	5,41	31,71	2,12
3									
	4	6,35	35,93	2,26	5,46	0,285	6,14	36,00	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 20 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 4$ m e $LH = 3,18$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	D (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)
4	4,452	6,35	39,8	2,26	5,80	0,328	8,11	47,55	2,51

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 21 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 6,0$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	D (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)
1	1,454	6,35	23,41	1,49	3,58	0,234	4,14	24,29	1,59
	2	6,35	28,57	1,75	3,98	0,245	4,54	26,60	1,70
	3	6,35	31,63	1,91	4,72	0,270	5,49	32,19	1,96
	4	6,35	36,84	2,17	5,46	0,303	6,96	40,78	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 22 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 6,0$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
2	2,487	6,35	30,92	1,72	4,34	0,274	5,67	33,21	1,82
	3	6,35	34,49	1,89	4,72	0,288	6,28	36,79	1,96
	4	6,35	40,23	2,15	5,46	0,324	7,95	46,60	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; V_u – volume útil; V_t – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 23 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento vertical, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 6,0$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Vertical Proposto				
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	D (m)	VI (L)	V_u (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$
3	3,533	6,35	38,16	1,90	5,12	0,324	7,96	46,62	2,13
	4	6,35	39,56	1,96	5,46	0,344	8,95	52,43	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; V_u – volume útil; V_t – volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; D - Diâmetro do tanque obtido pelo dimensionamento.

A Tabela 24 a seguir, produzida a partir dos dados das Tabelas 17 a 23, compara os valores teóricos da Lei de Boyle com os valores de dimensionamento propostos calculados a partir da correção de 35% na relação final $(Vu+VI)/(Vt+VI)$, pela equação 31. Desta forma, confirma-se o aumento percentual efetivo obtido no dimensionamento vertical proposto para o tanque modelo 2.

Tabela 24 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no dimensionamento vertical do tanque modelo 2 com aumento percentual teórico 'p' de 35%.

Médias do Dimensionamento Vertical Proposto				
H_s (m)	9,65 (9,65-H_s)	H_s' (m)	(V_u+V_l) (V_t+V_l)	Aumento Percentual Efetivo (%)
1,29	1,15	3,46	1,56	35,05
2,23	1,30	4,15	1,76	35,13
3,17	1,49	4,85	2,01	35,19
4,06	1,73	5,51	2,33	35,11

H_s - altura manométrica de sucção; V_l – volume livre; V_u – volume útil; V_t – volume da tubulação;
H_s' - altura manométrica de sucção corrigida;

4.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO HORIZONTAL: TANQUE MODELO 2

Embora um diâmetro inicial de 0,3 m tenha sido adotado para o dimensionamento, verificou-se que a proporção final 'V_u/V_t' não é afetada por essa escolha, mantendo-se constante em todos os testes assim como no dimensionamento horizontal do tanque modelo 1.

Tabela 25 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 3,18$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	C (m)	V_u (L)	$V_u/$ V_t
1	1,1332	6,35	18,96	1,66	3,34	0,18	12,55	1,53
	2	6,35	23,86	1,98	3,98	0,20	13,98	1,70
	3	6,35	30,92	2,44	4,72	0,23	16,08	1,96
	4	6,35	38,67	2,95	5,46	0,27	18,92	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 26 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 3,18$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	C (m)	V_u (L)	$V_u/$ V_t
2	2,433	6,35	23,29	1,75	4,30	0,26	18,36	1,81
	3	6,35	27,65	2,00	4,72	0,28	19,93	1,96
	4	6,35	33,78	2,36	5,46	0,33	23,45	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 27 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $hg = 3$ m e $LH = 3,18$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
hg (m)	Hs (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	Hs' (m)	C (m)	Vu (L)	Vu/ Vt
3	3,493	6,35	31,22	2,01	5,09	0,36	25,67	2,12
	4	6,35	35,93	2,26	5,46	0,40	27,98	2,31

hg - Altura geométrica de sucção; Hs - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; Hs' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 28 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $hg = 4$ m e $LH = 3,18$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
hg (m)	Hs (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	Hs' (m)	C (m)	Vu (L)	Vu/ Vt
4	4,452	6,35	39,8	2,26	5,80	0,50	35,33	2,51

hg - Altura geométrica de sucção; Hs - altura manométrica de sucção; VI – volume livre; Vu – volume útil; Vt – volume da tubulação; Hs' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 29 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 1$ m e $LH = 6,0$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	C (m)	V_u (L)	$V_u/$ V_t
1	1,454	6,35	23,41	1,49	3,58	0,31	21,85	1,59
	2	6,35	28,57	1,75	3,98	0,33	23,41	1,70
	3	6,35	31,63	1,91	4,72	0,38	26,93	1,96
	4	6,35	36,84	2,17	5,46	0,45	31,69	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 30 - Valores comparativos da relação $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 2$ m e $LH = 6,0$ m.

	Experimento Bettini				Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	V_l (L)	V_u (L)	$(V_u+V_l)/$ (V_t+V_l)	H_s' (m)	C (m)	V_u (L)	$V_u/$ V_t
2	2,487	6,35	30,92	1,72	4,34	0,40	28,57	1,82
	3	6,35	34,49	1,89	4,72	0,44	30,77	1,96
	4	6,35	40,23	2,15	5,46	0,51	36,22	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; V_l - volume livre; V_u - volume útil; V_t - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 31 - Valores comparativos da relação $(Vu+VI)/(Vt+VI)$ no tanque modelo 2 para dimensionamento horizontal, considerando $h_g = 3$ m e $LH = 6,0$ m.

Experimento Bettini					Dimensionamento Horizontal			
h_g (m)	H_s (m)	VI (L)	Vu (L)	$(Vu+VI)/$ $(Vt+VI)$	H_s' (m)	C (m)	Vu (L)	$Vu/$ Vt
3	3,533	6,35	38,16	1,90	5,12	0,53	37,64	2,13
	4	6,35	39,56	1,96	5,46	0,58	40,75	2,31

h_g - Altura geométrica de sucção; H_s - altura manométrica de sucção; VI - volume livre; Vu - volume útil; Vt - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida; C - Comprimento do tanque obtido pelo dimensionamento.

Tabela 32 - Valores comparativos da relação Vu/Vt no dimensionamento horizontal do tanque modelo 2 com aumento percentual teórico 'p' de 35%.

Médias do Dimensionamento Horizontal Proposto				
H_s (m)	9,65 (9,65- H_s)	H_s' (m)	$Vu/$ Vt	Aumento Percentual Efetivo (%)
1,29	1,15	3,46	1,56	35,05
2,23	1,30	4,15	1,76	35,13
3,17	1,49	4,85	2,01	35,19
4,06	1,73	5,51	2,33	35,11

H_s - altura manométrica de sucção; VI - volume livre; Vu - volume útil; Vt - volume da tubulação; H_s' - altura manométrica de sucção corrigida;

Através da análise comparativa das Tabelas 25 a 31, a Tabela 32 evidencia que, assim como no modelo vertical, a utilização da equação 31 foi igualmente eficaz para o ajuste de 35% da relação Vu/Vt no dimensionamento horizontal proposto do tanque modelo 2.

As sutis diferenças entre os valores de aumento percentual teórico e efetivo verificados são provenientes da proposta de avaliação da média dos valores

obtidos ao invés da avaliação ponto a ponto de cada situação de dimensionamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais dos dois modelos de tanque, dispostos nas tabelas anteriores, foram comparados para avaliar a precisão das Equações 21 e 37 no dimensionamento de diâmetro e comprimento, para tanques verticais e horizontais respectivamente, considerando a correção percentual da relação final $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ pela Equação 31. As principais observações foram:

- A Equação 31, utilizada para correção percentual da relação final $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$ de dimensionamento pode ser utilizada para as condições de dimensionamento avaliadas.
- A Equação 21, para dimensionamento do diâmetro de tanques verticais com altura pré-definida, demonstrou-se aplicável nas condições avaliadas, desde que se realize um ajuste percentual, aplicado pela equação 31, que considere as especificidades experimentais do modelo de montagem do tanque.
- A Equação 37, para dimensionamento do comprimento de tanques horizontais a partir de um diâmetro pré-definido, demonstrou-se aplicável nas condições estudadas, desde que se realize um ajuste percentual, aplicado pela equação 31, que considere as especificidades experimentais do modelo de montagem do tanque.

Embora a validação comparativa tenha sido restrita aos dois modelos de tanque apresentados por Bettini et al. (2008), as equações de dimensionamento e correção percentual são de caráter genérico. Portanto, presume-se que suas aplicações sejam viáveis para outros modelos de montagem de tanques, sendo possível definir a diferença percentual a ser aplicada na proporção final $(V_u+V_l)/(V_t+V_l)$. Para confirmação desta hipótese, sugere-se a realização de estudos adicionais de investigação.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do estudo ora apresentado, sugerem-se propostas para trabalhos futuros:

6.1 Desenvolvimento de um aplicativo para dimensionamento de tanques de escorva, com base em informações e especificidades da sucção.

6.2 Validação experimental de modelos físicos, com base na Lei de Boyle no formato linear e não-linear, e de baixo custo para tanques de escorva considerando também a variação do diâmetro comercial da tubulação de sucção.

7. REFERÊNCIAS

BETTINI, Marcos O. et al. Avaliação de Tanques de Escorva Utilizados em Substituição à Válvula-de-Pé em Instalações de Bombeamento. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p.460-470, set. 2008.

CARVALHO, D. F. Instalações elevatórias: bombas. 6. ed. Belo Horizonte: UFMG/FUMARC, 1999. 353p

CARVALHO, R.J.Instalações hidráulicas e o projeto de arquitetura(4. ed.). Blücher. 2013.

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A. 2013. Termodinâmica. 7. ed., New York, NY, Mc Graw Hill, 1048 p. MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N., MUNSON, B.R.; DEWITT, D. P. 2005. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 620 p.

DAL BEM, Julio César Trevisan et al. Solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica. In: Congresso Brasileiro de Energia SolarCBENS. 2016. p. 1-8.

FURTADO, Rodrigo Braga. Determinação de curvas NPSH em Bombas Centrífugas. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa.

FRANCESCHINI ZINANI, Flávia Schwarz; ADAMY, Lucas. Modelagem de um Tanque de Escorva para Bomba em Sistema de Descarte de Óleo. Estudos Tecnológicos em Engenharia, v. 12, n. 1, 2018.

MACINTYRE, A.J. Bombas e instalações de bombeamento.2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 782p.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. 1998. Bombas industriais. 2. ed., Rio de Janeiro, RJ, Interciência.

MORAIS, Fabio Maia de. Sobre o teorema do valor intermediário. 2013.

RAMALHO JÚNIOR, F.; FERRARO, N.G.; SOARES, P.A.de T. Os fundamentos da física. 6.ed. São Paulo: Moderna, 1996. v.2, 463 p.

SILVA, R. A. F. Fabricação e estudo de uma bomba hidráulica de baixo custo: Bomba de corda. Monografia (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 33 p. Natal – RN, 2018.

SISSOM, L.E.; PITTS, D.R. Fenômenos de transporte. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 765 p.

VAZQUEZ, Fabio José Buchedid; JACINTO, Julio Cesar Pavanelli. Problemas de cavitação e estratégias de prevenção. Dataset Reports, v. 3, n. 1, p. 247-256, 2024.

VILLA NOVA, N.A.; TOMAZELA, C.; DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L. Dimensionamento de um balão de escorva. In: TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DO FEIJÃO IRRIGADO, 1997, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ - USP, 1997. p.159-62.

VILELA, L.A.A.; BOTREL, T.A.; SOCCOL, O.J.; GERVÁSIO, E.S.; NETO, O.R. Dispositivo para monitoramento da operação de conjuntos motobomba elétricos. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.23, n.2, 2003, p. 250-6.