

O USO DA BOMBA D'ÁGUA MANUAL COMO RECURSO DIDÁTICO NAS AULAS DE HIDROSTÁTICA E HIDRODINÂMICA

The use of the manual water pump as a didactic resource in hydrostatics and hydrodynamics classes

Fernando de Freitas Marques Calazans [fernando.calazans@alunos.ufersa.edu.br]

Jusciane da Costa e Silva [jusciane@ufersa.edu.br]

*Departamento de Ciências Exatas e Naturais, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física
- Polo 09, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró*

Rua Francisco Mota, 570, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

Naiara Cipriano Oliveira [naiara.cipriano@urca.br]

Universidade Regional do Cariri

Museu de Paleontologia Plácido Cidade Nuvens

Rua Plácido Cidade Nuvens, 326, Santana do Cariri, Ceará, Brasil

Gustavo Oliveira Gurgel Rebouças [gustavoreboucas@ufersa.edu.br]

*Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia da Informação, Mestrado Nacional Profissional em
Ensino de Física-Polo 09*

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Angicos

Rua Gamaliel Martins, 587, Alto da Alegria, Angicos, Rio Grande do Norte, Brasil

Recebido em: 30/08/2023

Aceito em: 17/12/2023

Resumo

O conceito de pressão no interior de um fluido encontra aplicação em diversos equipamentos do cotidiano, como bombas de água manuais e elétricas, borrifadores de água e nebulizadores de ar, estes são apenas alguns dos dispositivos nos quais os conceitos envolvidos são empregados sem que se perceba. No entanto, a abordagem desse conceito em sala de aula é frequentemente feita de forma teórica. No caso de um fluido em equilíbrio, a relação entre a pressão e a profundidade é dada pelo teorema de Stevin, que pode ser facilmente observado ao mergulhar gradativamente, aumentando a profundidade, em uma piscina. Assim, para uma melhor compreensão dos conceitos ligados à mecânica dos fluidos, propomos a construção de um aparato experimental: um vaso comunicante. O objetivo deste experimento é elucidar o funcionamento de uma bomba manual d'água utilizada em garrações de 20 litros, garrafas PET e em uma pisseta de laboratório. A bomba desempenha a função de retirar a água ao elevar a coluna líquida até a saída do recipiente. O princípio deste experimento didático é observar o comportamento de uma ou mais colunas de água acopladas ao recipiente por meio de tubos transparentes, que podem ser mangueiras comuns de diâmetros diferentes. Dessa maneira, ao empregar a bomba, é possível examinar o comportamento da coluna de água nos tubos e, conseqüentemente, medir a pressão interna que ela gera com base no teorema de Stevin. O sistema de vasos comunicantes possibilita a ligação de um dos tubos à câmara de ar do recipiente. Com essa montagem, a superfície de um dos tubos ficará em contato com a pressão interna do ar contido no recipiente, e não com a pressão atmosférica. Desse modo, os vasos comunicantes funcionam como um manômetro, permitindo a identificação da diferença de pressão por meio da diferença de altura entre as colunas de água. Além disso, podemos determinar a velocidade de saída da água nas bombas e o seu alcance utilizando a equação de Bernoulli. Portanto, as montagens propostas visam o entendimento das bombas por meio dos conceitos básicos da hidrostática e da hidrodinâmica.

Palavras-chave: Bomba d'água; Hidrostática; Hidrodinâmica; Ensino de Física.

Abstract

The notion of pressure within a fluid applies to numerous commonplace apparatuses, including manual and electric water pumps, water sprayers, and air nebulizers. These represent only a few devices where the underlying concepts are employed imperceptibly. Nevertheless, the presentation of this concept in the classroom is frequently theoretical. For a fluid in equilibrium, the connection between pressure and depth is established by Stevin's theorem, which can be readily witnessed while progressively submerging and increasing the depth in a swimming pool. Therefore, to enhance comprehension of concepts linked to fluid mechanics, we suggest constructing an experimental apparatus known as a communicating vessel. The purpose of this device is to clarify the operation of a manual water pump employed in 20-liter jugs, PET bottles, and laboratory wash bottles. The pump carries out the task of eliminating the water by raising the liquid column to the container's outlet. The concept behind this didactic experiment is to observe the behavior of one or more water columns linked to the container through transparent tubes, which could be standard hoses of varying diameters. By using the pump, one can investigate the water column's behavior within the tubes and measure the internal pressure it generates based on Stevin's theorem. The communicating vessel system enables the attachment of one of the tubes to the container's air chamber. Through this arrangement, the surface of one tube comes into contact with the internal pressure of the air held within the container rather than the atmospheric pressure. In this way, the communicating vessels function like a manometer, enabling the differentiation of pressure using the variation in height between the water columns. Furthermore, we can determine the velocity at which water leaves the pumps and its trajectory, employing Bernoulli's equation. Consequently, the suggested setups are aimed at the comprehension of pumps through basic concepts of hydrostatics and hydrodynamics.

Keywords: Water pump; Hydrostatic; Hydrodynamics; Physics teaching.

Introdução

Diversas grandezas físicas estão relacionadas às sensações do corpo humano. Por exemplo, a temperatura está associada às sensações de quente e frio, enquanto a força está ligada ao esforço muscular. No entanto, o sistema sensorial humano é inerentemente limitado e pouco confiável para mensurar com precisão tais grandezas. A pressão está presente no cotidiano, muitas vezes passando despercebida. Exemplos incluem a pressão atmosférica, a pressão ao mergulhar em uma piscina, a saída de água nas torneiras e chuveiros, em botijões de gás (onde o gás é pressurizado), na pressurização do ar em aviões, em painéis de pressão, garrafas de bebidas gaseificadas, no *Airsoft* (efeito *hop-up*), em chaminés, tubulações, na sustentação de aviões, em dispositivos de Venturi, no calibre de vasos sanguíneos (Fox *et al.*, 2018), entre outros. Nesses casos, deparamo-nos com situações de pressão em gases, líquidos e em ambos os meios.

Diversos trabalhos apresentam propostas didáticas utilizando materiais acessíveis para estudar a hidrodinâmica de fluidos incompressíveis, com o objetivo de investigar a velocidade de saída do fluido por uma abertura usando conceitos de hidrodinâmica e cinemática (Jesus & Macedo Junior, 2011; Kireš, 2006; Moraes, Baptista, Souza, & Santos, 2020; Pavesi, 2019). Alguns trabalhos mais específicos abordam a equação de Bernoulli (Ivanov, Nikolov, & Petrova, 2014), o estudo do tubo de Venturi com uso de arduino (Cid & Correa, 2019) e o princípio de Torricelli para escoamento lateral (Guerra, Plaisted, & Smith, 2005). Esses experimentos, dentre outros trabalhos, representam boas opções para despertar o interesse dos discentes em sala de aula, permitindo a associação da teoria estudada com aplicações em seu cotidiano. Além disso, o fato de serem de baixo custo e utilizar materiais acessíveis torna-os facilmente realizáveis em escolas que não disponham de um laboratório sofisticado.

Neste estudo, são propostos dois modelos de bomba d'água manuais como recursos didáticos para a exploração de conceitos de hidrostática e hidrodinâmica. As bombas selecionadas são utilizadas em garrações de água mineral (20 L) e em garrafas tipo PET (2 L). Elas apresentam princípios de funcionamento idênticos, mesmo para recipientes de volumes diferentes. Os recipientes são pressurizados pela injeção de ar em seu interior, resultando no aumento da pressão interna e no deslocamento do líquido até a válvula de saída. Um modelo simples de vasos comunicantes foi construído de modo que ele possa ser acoplado ao recipiente tanto em sua parte inferior, onde o líquido ocupa os vasos, quanto em sua parte superior, onde o ar é injetado pela bomba d'água manual. De posse deste equipamento, é possível desvendar toda a física envolvida, destacando o teorema de Stevin e o princípio de Pascal para a hidrostática, bem como as equações da vazão e de Bernoulli para a hidrodinâmica. Isso demonstra que uma abordagem experimental simples desperta o interesse e a participação dos discentes.

Hidrostática e hidrodinâmica

Um fluido, seja líquido ou gás, apresenta a capacidade de escoamento devido às interações que ocorrem entre suas moléculas. Ele se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, independentemente da magnitude aplicada (Fox *et al.*, 2018). Contudo, o estudo de fluidos reais apresenta certas complexidades, e por questões de simplicidade, é comum utilizar a idealização de um fluido. Este é considerado ideal quando é incompressível e ausente de atrito interno (Young & Freedman, 2015).

Em um recipiente fechado, por exemplo, um fluido em repouso exerce uma força perpendicular sobre qualquer superfície que esteja em contato com ele. A esta força por unidade de área, dá-se o nome de pressão hidrostática (Fox *et al.*, 2018). Apesar de o fluido estar em repouso, as moléculas que o constituem estão em movimento. Ou seja, as forças que geram a pressão hidrostática são originadas das colisões moleculares entre si e com as superfícies vizinhas. Os líquidos são aproximadamente incompressíveis, sendo mais próximos de fluidos ideais. Por outro lado, um gás é considerado ideal quando as diferenças entre pressões de pontos próximos são desprezíveis (Young & Freedman, 2015). Desse modo, para uma melhor compreensão dos conceitos físicos envolvidos neste trabalho, os fluidos, ar e água, serão classificados como ideais.

Para um líquido em equilíbrio, a pressão em um ponto qualquer, p_2 , pode ser encontrada a partir de uma pressão conhecida em outro ponto, p_1 , dada por:

$$p_2 = p_1 + \rho g(y_2 - y_1), \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica do líquido, g é a aceleração da gravidade (aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$) e y_1 e y_2 são as alturas relativas de dois pontos quaisquer. Costumeiramente, a Equação (1) é expressa em termos da profundidade h , dada pela diferença entre as alturas ($y_2 - y_1$). A Equação (1) é denominada teorema de Stevin (TS) para um fluido ideal em equilíbrio hidrostático, permitindo determinar a pressão em um ponto qualquer no interior de um fluido (Brunetti, 2008).

A Figura 1(a) ilustra um exemplo comum no estudo da hidrostática, no qual, ao utilizar o TS e conhecendo a pressão atmosférica, p_1 , na superfície entre o líquido e o ar, é possível determinar a pressão numa profundidade h para um líquido em equilíbrio hidrostático. Uma vez que a pressão depende somente da profundidade h , as pressões nos pontos p_2 e p_3 são equivalentes. Portanto, a partir do TS, pode-se entender diversas aplicações da hidrostática, como o funcionamento de vasos comunicantes, a utilização do nível de pedreiro em construções, o aumento da pressão com a profundidade ao mergulhar no mar, entre outras.

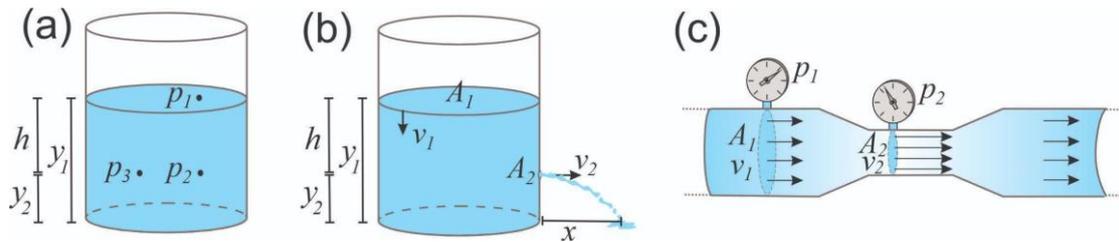


Figura 1: Problemas típicos de hidrostática e hidrodinâmica: (a) pressão em dois pontos de um fluido contido num recipiente, situados a diferentes profundidades, (b) escoamento lateral de um líquido através de um orifício e (c) tubo de Venturi. Fonte: Os autores.

No caso de um líquido ideal em movimento, a equação de Bernoulli (EB), juntamente com a equação da vazão (EV), assume grande importância para o seu entendimento, mesmo considerando algumas restrições. Nestes casos, é comum utilizar um escoamento idealizado. Para que um escoamento seja considerado ideal, é necessário que ele apresente um regime permanente, seja ausente de atrito, ocorra ao longo de uma linha de corrente, seja incompressível, uniforme nas seções de áreas de interesse e ausente de turbulência (Fox *et al.*, 2018; Young & Freedman, 2015). Desse modo, a EB pode ser descrita como:

$$p + \rho gy + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}, \quad (2)$$

o trinômio da EB é obtido pelo teorema trabalho-energia e estabelece que, em todos os pontos de um líquido que flui em um circuito ou tubulação, sem se dividir ou se juntar, a soma dos três termos é constante. Isso permite a comparação da equação entre quaisquer dois pontos de um escoamento ideal.

Ainda para um escoamento ideal, a EV, ou equação da continuidade, estabelece que a vazão volumétrica R_v , ou seja, o volume de fluido que atravessa uma determinada área de seção transversal A , é constante para um mesmo intervalo de tempo do escoamento ideal já mencionado. A vazão é comumente expressa em termos da área de seção transversal A e da velocidade v perpendicular a esta área, conforme segue:

$$R_v = Av. \quad (3)$$

Desse modo, assim como a EB, a EV é constante em quaisquer dois pontos ao longo do escoamento ideal. Em alguns problemas práticos, EB e EV são usadas conjuntamente, como por exemplo, no escoamento de um líquido por um orifício lateral. Esta aplicação simples é apresentada em livros didáticos com o objetivo de identificar a velocidade de saída do líquido através de um orifício, e a aplicação pode ser vista esquematizada na Figura 1(b).

Usando a EV e considerando o ponto 1 na superfície do recipiente aberto à atmosfera e o ponto 2 como a saída do orifício lateral, ambos sujeitos à pressão atmosférica, e sabendo que a área de seção transversal do orifício (A_2) é muito menor que a área superior do recipiente (A_1), ou seja, $A_2 \ll A_1$, é possível obter a aproximação $v_1 \approx 0$. Isso implica que a velocidade de descida da superfície interna do líquido é extremamente baixa, quase imperceptível. Com base nessas considerações, a EB pode ser empregada para calcular a velocidade do fluido, v_2 , que flui através do orifício:

$$v_2 = \sqrt{2gh}, \quad (4)$$

a Equação (4) foi obtida por Torricelli no século XVII, antes de Daniel Bernoulli propor sua equação em 1738 (Sommerfeld, 1950).

Um exemplo muito comum sobre escoamento presente nos livros didáticos de hidrodinâmica é o tubo de Venturi. A Figura 1(c) ilustra o escoamento de um fluido em uma tubulação que reduz sua área (A_1) para uma área (A_2). Usando a EV para esses dois pontos, temos que a velocidade no ponto mais estreito aumentará por um fator de A_1/A_2 . Na EB, a diferença de pressão entre os pontos 1 e 2 será expressa como

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{A_1 - A_2}{A_2} \right)^2. \quad (5)$$

Portanto, a pressão é maior na área de seção transversal maior em relação ao estreitamento. Esse fenômeno é conhecido como princípio de Bernoulli, que afirma que, quanto menor a velocidade de um fluido, maior será a pressão (Kamela, 2007). O tubo de Venturi encontra diversas aplicações práticas, como pistolas de pintura, aeradores de água, misturadores de líquidos ao longo da tubulação, sistemas de hidroponia, entre outros (Young & Freedman, 2015). Apesar de ser uma aproximação e necessitar de algumas limitações, a EB auxilia na compreensão do comportamento real de fluidos em diversas situações e pode ser ainda aperfeiçoada, de modo que a Equação (2) se modifica para fluidos e escoamentos não ideais, aproximando-se cada vez mais do comportamento real, muitas vezes requeridos em contextos de engenharia (Qin & Duan, 2017; Fox *et al.*, 2018).

Bombas manuais utilizadas

A bomba d'água (BA) é um dispositivo empregado para movimentar água de um ponto a outro, geralmente elevando-a de um reservatório inferior para um reservatório superior. Neste estudo, foram utilizadas duas BAs simples que podem ser facilmente adquiridas no comércio local. A primeira, representada na Figura 2(a), é comercializada como “bomba para garrafão de água” e é compatível com a maioria dos garrafões de 10 e 20 L. A segunda, representada na Figura 2(c), é designada como “pulverizador para garrafa PET” e se adapta, em grande parte, às garrafas PET disponíveis no mercado. Esta última possui uma válvula que libera o líquido quando acionada, ao contrário da primeira, na qual o líquido é liberado diretamente quando a pressão é suficiente para elevar a água na coluna interna.

O princípio básico de funcionamento das bombas baseia-se no aumento da pressão interna do recipiente, o que resulta na elevação do líquido através do tubo interno que o conecta à atmosfera. Esse processo de elevação pode ser analisado pela Equação (1), a qual está diretamente relacionada com a diferença de pressões. Contudo, uma vez que o objetivo prático das BAs é retirar a água do recipiente, não apenas elevá-la, torna-se necessário lidar com os conceitos da hidrodinâmica. As Figuras 2(b) e (d) mostram esquematicamente os detalhes do funcionamento das BAs, com o fluido sendo expelido do recipiente. O manuseio das BAs promove o bombeamento de ar para o interior do recipiente, elevando assim a pressão p_1 na câmara de ar. A interface entre o gás e o líquido compartilha da mesma pressão, p_1 . A altura da coluna de água no interior do recipiente é representada por y_1 , enquanto y_2 corresponde à altura do ponto de saída do líquido até a base inferior do recipiente; conseqüentemente, p_2 é dada pela pressão atmosférica. Os índices 1 e 2 referem-se às grandezas relacionadas à superfície interna do líquido nos recipientes e à saída do líquido nas BAs, respectivamente. Todas as alturas são medidas em relação à base inferior do recipiente.

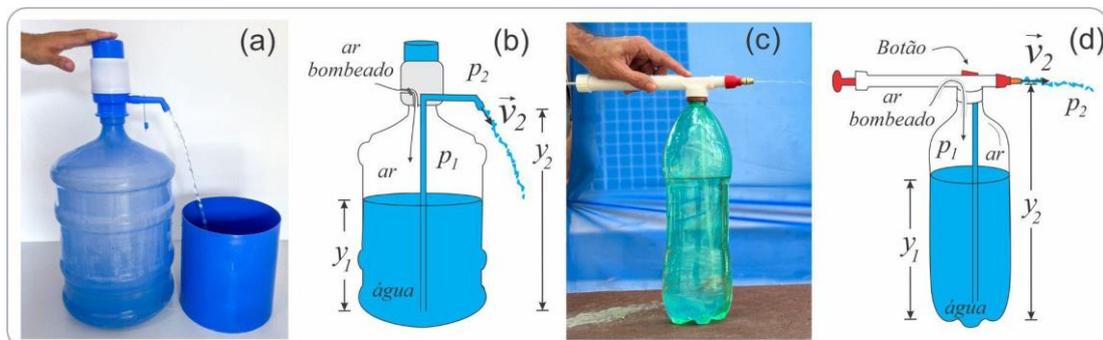


Figura 2: Montagem e manuseio das bombas d'água utilizadas em (a) garrafão de 20 L e (c) garrafa PET de 2 L. Em (b) e (d) detalhamento esquemático da injeção de ar nos recipientes. Fonte: Os autores.

A EV pode ser usada para indicar a relação entre a velocidade de descida da superfície interna do líquido, ponto 1, com sua velocidade de saída, ponto 2. Considerando as áreas de seção transversal,

em relação à velocidade de escoamento, como sendo circulares, a velocidade do fluido na superfície interna do recipiente, v_1 , em relação à velocidade de saída, v_2 , é dada por:

$$v_1 = \delta^2 v_2, \quad (6)$$

onde o parâmetro δ é a razão entre o diâmetro da área de saída do líquido para a região externa, d_2 , e o diâmetro da superfície interna, d_1 . Desse modo, associando a Equação (6) com a EB em (2), obtém-se a velocidade de saída v_2 ,

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \delta^4)} + \frac{2g(y_1 - y_2)}{(1 - \delta^4)}}. \quad (7)$$

Portanto, de acordo com a Equação (7), a velocidade de saída v_2 aumentará à medida que a diferença entre a pressão interna e a pressão atmosférica ($p_1 - p_2$) aumentar, e será reduzida à medida que o valor absoluto da diferença entre as alturas ($y_1 - y_2$) diminuir. Esse fenômeno pode ser observado empiricamente por aqueles que utilizam uma das bombas apresentadas na Figura 2, ao relacionar o esforço necessário para bombear o ar com o aumento da pressão interna requerida para permitir o fluxo de água através da válvula de saída no ponto 2. Além disso, é possível aplicar a simplificação $d_1 \gg d_2$, o que implica $\delta \ll 1$, indicando que a velocidade de descida da superfície interna é tão imperceptível quanto menor a razão. Um exemplo que facilmente leva ao limite da razão $\delta \ll 1$ é o caso de uma represa, onde a área do espelho d'água é consideravelmente maior que a área de seção transversal pela qual o fluido escoava.

Materiais e Métodos

Para estudar o funcionamento das BAs selecionadas, foram efetuadas algumas modificações nos recipientes, ou seja, garrafão de 20 L e garrafa PET 2 L, cuja finalidade é acoplá-los a um sistema de vasos comunicantes (SVC) proposto neste trabalho. Ambos os recipientes foram equipados com duas torneiras, uma posicionada na parte superior e outra na parte inferior, como mostrado na Figura 3(a) e (b). A torneira inferior foi conectada de maneira a permitir que o líquido da parte inferior do recipiente entre em contato com o líquido do SVC. Por outro lado, a torneira superior ficou em contato com a câmara de ar do recipiente, podendo também ser conectada a um dos tubos do SVC.

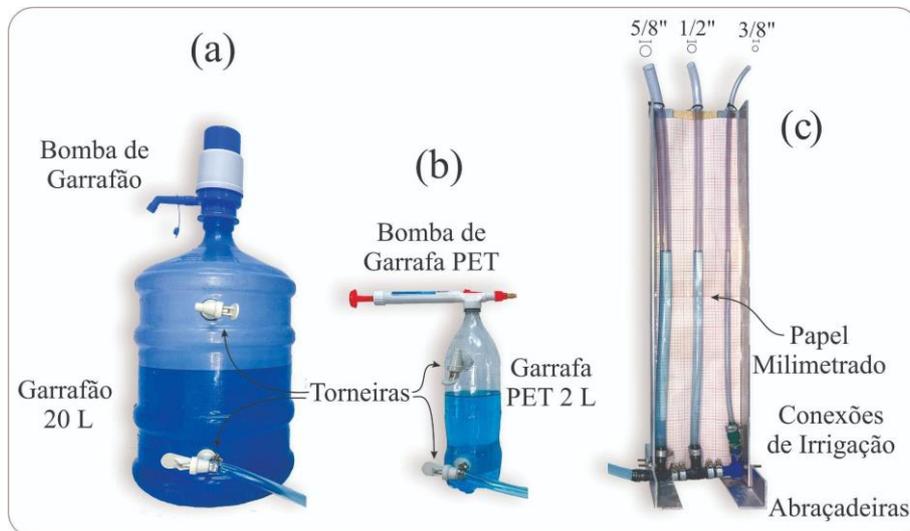


Figura 3: Adaptações realizadas no (a) garrafão de 20 L, (b) na garrafa PET de 2 L e (c) no sistema de vasos comunicantes com mangueiras e conexões de irrigação. Fonte: Os autores.

O SVC foi construído utilizando mangueiras com diferentes diâmetros, conexões de irrigação, abraçadeiras e uma estrutura de sustentação, neste caso, um “perfil em L” de alumínio, como pode ser visto na Figura 3(c). É importante mencionar que um docente mais familiarizado com o uso de madeira pode optar por construir a estrutura de sustentação com este material. Os diferentes diâmetros de mangueiras têm como objetivo mostrar que é a altura da coluna do líquido que define a pressão

hidrostática, conforme indicado pela Equação (1). Dessa forma, se as extremidades das mangueiras estiverem voltadas à atmosfera, a altura das colunas será a mesma.

A possibilidade de conectar um dos tubos do SVC à coluna de ar do recipiente também é viável. Nesse cenário, a superfície de um dos tubos estará em contato com a pressão interna do ar no recipiente, em vez da pressão atmosférica. Nesta configuração, o SVC atua como um manômetro, permitindo a determinação da diferença de pressão por meio da diferença na altura das colunas de água, além da superfície interna do líquido no recipiente, usando o TS, Equação (1). Na próxima seção, serão apresentadas diversas propostas de montagens para o aparato experimental. Estas sugestões visam:

1. Identificar visualmente a elevação da coluna de ar no SVC em função do aumento da pressão interna do recipiente por meio da BA;
2. Relacionar o aumento da pressão interna no recipiente com o TS, Equação (1);
3. Compreender que a elevação da coluna de água independe do volume dos tubos do SVC, mas sim da profundidade, através dos tubos de diâmetros diferentes;
4. Reconhecer que a pressão entre o líquido e o gás é compartilhada na superfície que os separa;
5. Demonstrar que o efeito da elevação das colunas de água pode ser obtido com outros tipos de bombas, como a bomba de ar utilizadas em bicicletas;
6. Identificar que mesmo quando o recipiente está vazio, a pressão interna pode ser aumentada tanto pelas BAs quanto pelas bombas de ar;
7. Calcular a velocidade de saída da água, bem como a distância do seu alcance.

Atividades Experimentais Propostas

Nesta seção, serão apresentadas sugestões de montagem que envolvem os recipientes acoplados às BAs e ao SVC, com o objetivo de relacionar o funcionamento desses dispositivos aos conceitos físicos da hidrostática e hidrodinâmica. O docente pode iniciar a aula apresentando o funcionamento convencional das BAs, sem as modificações, introduzindo uma pergunta-chave, como: “*Como as bombas utilizadas neste estudo funcionam?*” ou “*Como o líquido se eleva pelo tubo interno e chega à saída da bomba?*”. Tais questões incentivarão os discentes a refletir e identificar os princípios físicos do funcionamento das BAs. Para auxiliar na compreensão, foram propostas quatro montagens do aparato experimental.

Na proposta de montagem 1 (M1), os recipientes com água, garrafão 20 L e garrafa PET, são conectados ao SVC através da torneira inferior, neste caso, não há a presença de uma BA, como mostrado na Figura 4. Tanto a parte interna do recipiente quanto os três tubos do SVC estão abertos à atmosfera, portanto, estão sob a mesma pressão. De acordo com o TS, Equação (1), a altura das colunas de água nas mangueiras (y_3) é igual à altura do líquido no recipiente (y_1). Dessa maneira, a M1 possibilita a identificação desse comportamento. Uma sugestão para implementar a M1 seria adicionar água ao recipiente e observar a elevação dos três tubos do SVC. Esse tipo de proposta é comumente empregado em ilustrações de livros didáticos para explicar o funcionamento da “mangueira de nível” usada por pedreiros, bem como de diferentes tipos de SVC. Além disso, pode ser utilizada para enfatizar que as superfícies entre o ar e o líquido compartilham a mesma pressão. Isso ocorre porque, nesse caso, todas as quatro superfícies estão sujeitas à pressão atmosférica.

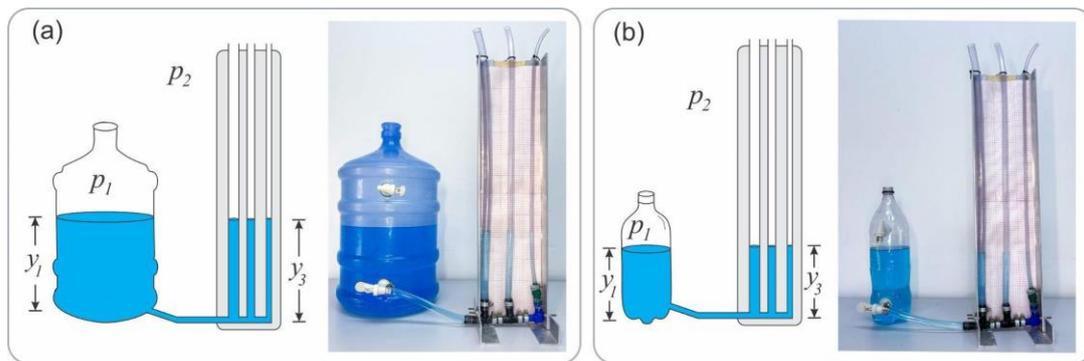


Figura 4: Montagem 1 - Proposta de experimentos com os recipientes sem tampas e sem a presença de bombas d'água, conectados ao sistema de vasos comunicantes. Uma imagem esquemática e outra real das propostas utilizadas estão apresentadas em (a) para o garrafão de 20 L e em (b) para a garrafa PET de 2L. Fonte: Os autores.

Na Montagem 2 (M2), como ilustrada na Figura 5, os recipientes com água estão conectados ao SVC através da torneira inferior, enquanto as BAs são acopladas às partes superiores dos recipientes. Ao operar as BAs, a pressão na câmara de ar, ou seja, a pressão interna do recipiente (p_1), aumenta. Consequentemente, à medida que as BAs são utilizadas, as alturas das colunas de ar (y_3) nos tubos do SVC se elevam em relação à superfície interna do recipiente (y_1). Nesse cenário, a altura dos tubos do SVC (y_3) equivale à altura do tubo interno da bomba. Essa elevação é responsável pela retirada do líquido durante o uso convencional da BA do garrafão de 20L. Embora não seja visível na imagem real, Figura 5(a), é relevante ressaltar que a coluna interna do garrafão está posicionada à mesma altura dos tubos do SVC, resultando em colunas niveladas.

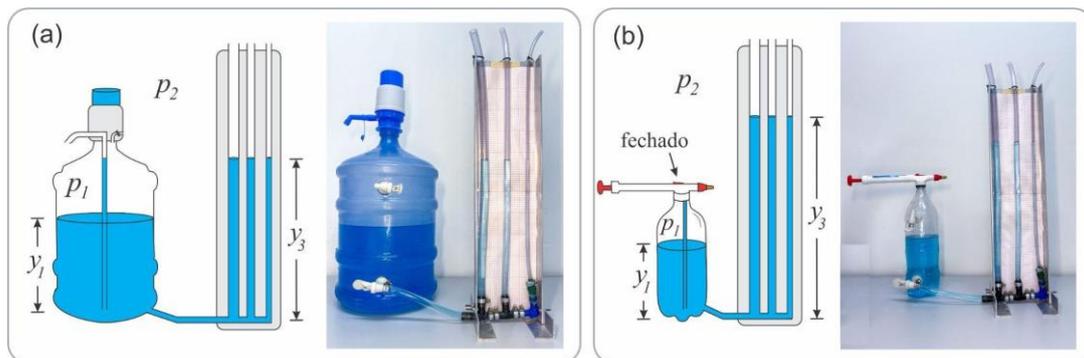


Figura 5: Montagem 2 - Proposta de experimentos com as bombas d'água conectadas ao sistema de vasos comunicantes por meio do (a) garrafão de 20L e (b) garrafa PET de 2L. Fonte: Os autores.

Na Figura 5(b), é apresentado um botão na BA que, ao ser acionado, libera o líquido. Contudo, como o botão está fechado nesse momento, é possível aumentar a pressão interna do recipiente de maneira a fazer com que y_3 ultrapasse y_1 . Para alcançar um efeito similar no garrafão, é necessário vedar a saída convencional do líquido de alguma forma, seja usando o próprio dedo ou a tampa acoplada à BA do garrafão. Nesse experimento, ao aplicar o TS é possível identificar a diferença entre a pressão interna p_1 e a pressão atmosférica p_2 .

A M2 proporciona uma visualização do princípio de Pascal: “A variação da pressão aplicada a um fluido incompressível contido em um recipiente é transmitida integralmente a todas as partes do fluido e às paredes do recipiente” (pág. 165, Halliday, Resnick, & Walker, 2016). Neste contexto, o aumento da pressão interna ocorre sempre que as BAs são manuseadas, e isso se manifesta claramente na elevação y_3 . Em outras palavras, a injeção de ar na câmara provoca um aumento na pressão na superfície interna do recipiente, resultando em um aumento da pressão p_1 . Esse aumento de pressão é então transmitido a todos os pontos do fluido. É importante destacar que, embora o líquido seja considerado perfeitamente incompressível e o recipiente seja assumido como completamente rígido, o ar é compressível, como evidenciado por esta montagem. A injeção de volume de ar não resulta em uma elevação proporcional no volume de líquido. Para a simulação desse efeito, é necessário adotar

uma abordagem criativa, assumindo que o volume de ar injetado possui uma ordem de grandeza comparável ao volume móvel da BA.

Na Montagem 3 (M3), em contraste com a M2, a torneira superior está conectada a um dos tubos do SVC. Dessa forma, a câmara de ar interna do recipiente fica em contato com esse tubo e, como resultado, a superfície interna do líquido no recipiente e a do tubo acoplado compartilharão a mesma pressão. Conforme ilustrado na Figura 6(a) e 6(b), ao manusear as BAs, a superfície interna do líquido e do tubo acoplado terão o mesmo nível, ou seja, y_1 e y_4 serão iguais. O índice 4 indica a altura da coluna de água para o tubo do SVC conectado à câmara de ar do recipiente. Os tubos do SVC abertos à atmosfera mantêm o nível (y_3), porém com elevação superior. A relação entre as diferenças de altura dos líquidos e as pressões externas e internas estão diretamente relacionadas ao TS, Equação (1). A pressão interna da câmara de ar (p_1), será igual à da superfície do líquido no tubo acoplado à parte superior do recipiente.

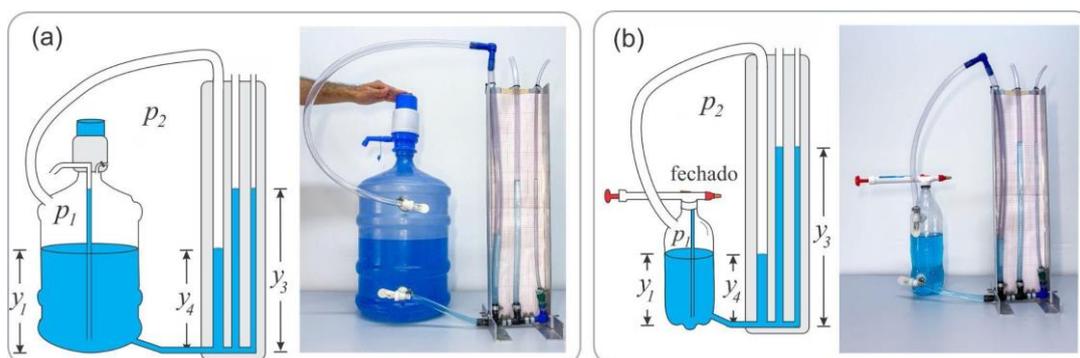


Figura 6: Montagem 3 - Proposta de experimentos demonstrando a utilização das duas bombas d'água, no qual um dos tubos do sistema de vasos comunicantes é conectado à câmara de ar dos recipientes. Fonte: Os autores.

Na Montagem 4 (M4), os recipientes estão sem água, com a torneira inferior fechada e a superior conectada a um dos tubos do SVC. A parte inferior do SVC foi vedada com o auxílio de uma rolha, conforme pode ser observado na Figura 7. Ao manusear as BAs, a pressão interna será aumentada, resultando em uma diminuição na altura da coluna de água (y_4), no tubo conectado, em comparação aos tubos abertos à atmosfera (y_3). A pressão p_1 do recipiente que contém apenas ar é determinada pelo TS, por meio das medições das alturas das colunas de água. Essa configuração permite detectar que as BAs aumentam exclusivamente a pressão interna da câmara de ar, resultando em uma pressão interna superior à pressão atmosférica. A M4 não exemplifica o uso convencional das BAs; no entanto, espera-se que essa montagem contribua para a compreensão dos conceitos físicos envolvidos e do funcionamento desses dispositivos.

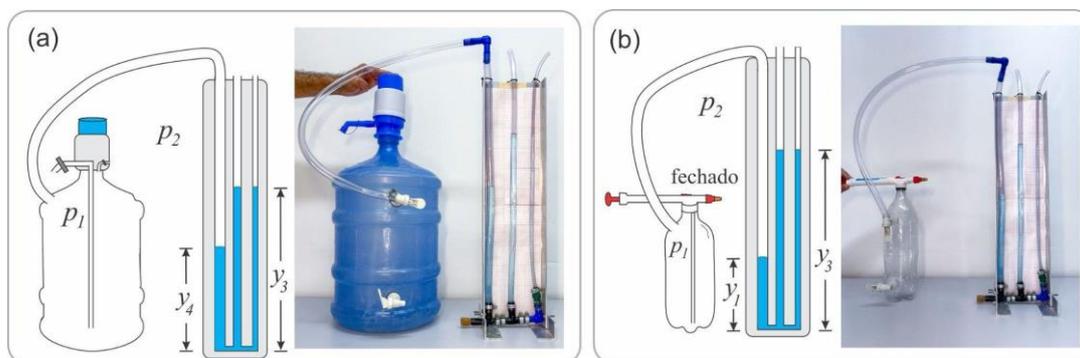


Figura 7: Montagem 4 - Proposta de experimentos com os recipientes sem água conectados a um dos tubos do sistema de vasos comunicantes. Fonte: Os autores.

Uma abordagem alternativa que proporciona uma compreensão dos conceitos envolvidos é empregar uma bomba de pneu de bicicleta. Para isso, é necessário adaptar uma válvula de pneu às

tampas dos recipientes. Nesse cenário, além do garrafão de 20 L, foi utilizado uma garrafa PET de 5 L, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8: Proposta de experimentos com as M2, M3 e M4 utilizando uma válvula de pneu adaptada às tampas dos recipientes, garrafão de 20 L e garrafa PET de 5L, e uma bomba de pneu de bicicleta. Fonte: Os autores.

A válvula de pneu possibilita que, por meio do uso de uma bomba de ar comum para pneus, os recipientes sejam pressurizados pela injeção de ar em seu interior, seguindo o mesmo princípio das BAs mencionadas anteriormente. Essa adaptação nas montagens viabiliza o estudo da pressão, permitindo a identificação do aumento da pressão interna e como o sistema de bombeamento eleva a pressão dentro do recipiente. Isso resulta em diferenças nas elevações, as quais foram observadas nas montagens anteriores.

As montagens propostas são de grande importância para identificar o comportamento hidrostático da água, através da observação das elevações das colunas de água no SVC e da aplicação do TS. Para estudar o comportamento hidrodinâmico, sugere-se que, na M2 ao manusear as bombas, seja considerado o movimento do fluido sendo expelido, conforme apresentado na Figura 9. Nesse momento, a água sairá com velocidade v_2 , e através da diferença de pressão entre o recipiente e o SVC, é possível calcular essa velocidade. Utilizando a relação $p_1 - p_2 = \rho g(y_3 - y_1)$, que pode ser inserida na Equação (7), e aplicando a aproximação $\delta \ll 1$, tem-se que

$$v_2 = \sqrt{2g(y_3 - y_2)}. \quad (8)$$

A Equação (8) demonstra que o aumento da pressão interna causado pela BA resulta na elevação da altura da coluna de água aberta à atmosfera (y_3), em comparação com a altura de saída da água (y_2), conforme descrito pela equação de Torricelli, Equação (4). Esse comportamento é completamente independente de y_1 , que corresponde à situação em que a saída ocorre lateralmente a uma profundidade ($y_3 - y_2$) em um recipiente aberto à atmosfera. A velocidade é limitada a zero quando essa profundidade é nula. Dessa forma, de maneira qualitativa, aqueles que manipulam a BA, de acordo com a montagem da Figura 9, podem perceber a relação entre o alcance do jato de água (x) e o aumento da coluna aberta à atmosfera do SVC.

A velocidade de saída do fluido obtida a partir da Equação (9) pode ser comprovada experimentalmente, utilizando mais uma aproximação. Dessa vez, pode-se aplicar os princípios da cinemática para obter o alcance x do lançamento horizontal com uma velocidade inicial v_2 e uma altura inicial y_2 , conforme esquematizado na Figura 9(a). Isso pode ser feito utilizando a velocidade obtida na Equação (8), de modo que

$$x = v_2 \sqrt{\frac{2y_2}{g}}. \quad (9)$$

Dessa forma, é viável ajustar a M3 para determinar o alcance do lançamento horizontal, x , utilizando a montagem apresentada na Figura 9, onde (a) é uma representação esquemática e (b) uma imagem real. Introduzimos um novo recipiente para a conexão com o SVC, neste caso, uma pisseta de 500 mL com as adaptações já mencionadas. A escolha da pisseta se justifica pelo fato de que a montagem da Figura 9, utilizando a BA de garrafa PET, demonstrou resultados insatisfatórios em relação à comparação entre as medidas do alcance horizontal x e seu valor esperado (x'), dado pela Equação (9). A diferença percentual, ρ , entre o alcance medido x e seu valor esperado x' obtido pela Equação (9) excedeu 100%. Por outro lado, o uso da pisseta na montagem proporcionou resultados satisfatórios tanto em relação a x quanto x' . A pisseta é uma BA comum em laboratórios e alguns ambientes hospitalares, projetada para bombear líquidos ao apertar o recipiente manualmente. A adaptação foi feita da mesma maneira que os demais recipientes, sendo acoplada ao SVC de acordo com a M3. A Figura 9 apresenta a montagem M3 com a pisseta acoplada ao SVC, permitindo o fluxo de água. A Figura 9(a) apresenta de forma esquemática os valores relevantes, com destaque para o alcance medido. A Figura 9(b) mostra a imagem real de uma medida realizada a partir da M3 utilizando a pisseta.

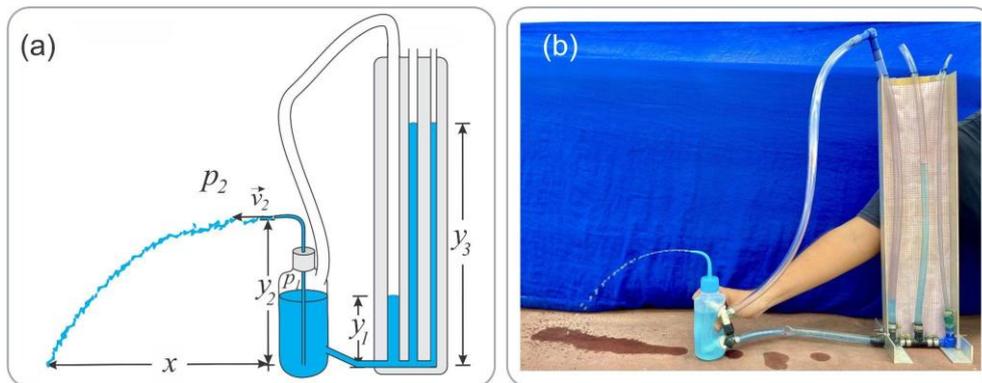


Figura 9: Proposta de experimento utilizando a pisseta com água fluindo e os recipientes acoplados ao sistema de vasos comunicantes conforme montagem 3. Fonte: Os autores.

Os valores na Tabela 1 correspondem à M3 usando a BA de garrafa PET, e estão refletidos nas duas primeiras linhas. A diferença entre os valores medidos e os obtidos pela Equação (9) ocorre devido a várias razões, incluindo aproximações e idealizações adotadas, mas principalmente porque a BA não é um dispositivo projetado especificamente para experimentos em laboratórios de física. O interior da bomba pode apresentar um escoamento turbulento entre a região do líquido no recipiente e a saída da bomba. Portanto, os resultados obtidos devem ser interpretados com certa cautela, considerando as limitações e peculiaridades do sistema experimental utilizado. Essa diferença pode ser destacada em sala de aula como um exemplo das limitações do excesso de aproximação realizadas e como um resultado que se distancia do esperado.

Tabela 1: Valores obtidos para o cálculo da velocidade v_2 utilizando as equações (8) e (9).

Medida	y_2 (m)	y_3 (m)	v_2 (m/s) Equação (8)	x (m) medido	x' (m) Equação (9)	ρ (%) (100%($x - x'$)/ x)
1 BA	0,35	0,57	2,07	0,24	0,55	131,2
2 BA	0,35	0,51	1,77	0,20	0,47	136,6
3 PI	0,24	0,48	2,17	0,47	0,48	2,1
4 PI	0,24	0,38	1,66	0,34	0,37	7,8
5 PI	0,24	0,50	2,25	0,50	0,50	0,0

Fonte: Os autores.

Para a montagem M3 com o uso da pisseta, os resultados estão apresentados nas últimas três linhas da Tabela 1, e uma boa correlação entre x e x' é observada, como evidenciado na última coluna da tabela. A vantagem do uso da pisseta é principalmente devido ao fato de que a água flui diretamente do recipiente, sem passar por um sistema tipo pulverizador, e a válvula da pisseta pode controlar a saída do fluido, assim como na BA da garrafa PET. Além disso, é perceptível que a saída d'água ocorre com menos turbulência em comparação com a BA de garrafa PET.

Considerações Finais

A disponibilidade de equipamentos de fácil aquisição e comuns no cotidiano proporciona uma oportunidade de trazer o conhecimento da física de um contexto distante e teórico para a prática, permitindo um entendimento de como as coisas realmente funcionam, e quais os princípios físicos envolvidos. O bombeamento de fluidos está presente em diversos aparelhos e dispositivos, e a partir das experiências apresentadas, espera-se que a atenção dos discentes seja direcionada e que eles passem a identificar a fenomenologia envolvida em seus funcionamentos. As montagens propostas constituem valiosas ferramentas experimentais interativas, projetadas para serem utilizadas em sala de aula. Elas podem ser construídas seguindo as instruções fornecidas ou adaptadas de acordo com os objetivos específicos, o nível de habilidade dos discentes, o tempo disponível e o contexto de aprendizagem. Na área da hidrostática, essas montagens possibilitam a observação do comportamento da pressão em relação à profundidade, bem como a comparação do SVC com um manômetro. Dessa forma, é possível identificar a pressão no interior do recipiente e compreender como as BAs funcionam ao aumentar a pressão interna, o que, por consequência, eleva a coluna interna de água permitindo sua saída para o exterior, conforme previsto pela teoria.

Assim, a proposta experimental de um SVC proporciona ao discente uma compreensão sólida das grandezas físicas relacionadas à hidrostática e hidrodinâmica de maneira visual e dinâmica. Apesar de os resultados calculados para a velocidade de saída do fluido pela BA, usando os princípios da hidrostática e a hidrodinâmica, não se aproximarem dos valores obtidos no lançamento horizontal, ainda é possível observar claramente que o aumento da pressão interna resulta em um aumento da velocidade de saída. Além disso, existe uma relação entre a diferença de altura interna do líquido no recipiente e a velocidade de saída, conferindo sentido a Equação (8). Adicionalmente, as medições foram aprimoradas com o uso da pisseta, permitindo a comparação do modo como o fluido escoava ao longo do circuito interno dos recipientes das bombas utilizadas. Isso proporciona uma oportunidade de avaliar o quão próximo esses tipos de fluidos se comportam em relação ao fluido ideal, bem como de um escoamento ideal.

A discrepância observada entre os valores calculados e os resultados experimentais reais destaca a distinção entre o ideal, onde simplificações matemáticas podem ser aplicadas para obter valores teóricos, e o mundo real, onde fatores complexos e muitas vezes negligenciados, podem influenciar os resultados de maneira significativa. Portanto, o aparato experimental demonstra um grande potencial como recurso didático, pois proporciona um ambiente de aprendizagem valioso para explorar os conceitos físicos de hidrostática e hidrodinâmica. Isso permite o entendimento, de maneira visual e prática, das grandezas físicas relacionadas aos conteúdos propostos, a partir do uso das BAs

e do SVC construído. Além disso, permite a construção de novos aparatos modificados a partir desta proposta.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa), através da Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, em colaboração com a Universidade Regional do Cariri (URCA) com o apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP #PV1-0187-00060.01.00/21).

Referências

- Brunetti, F. (2008). *Mecânica dos Fluidos* (2ª Ed.). São Paulo: Pearson.
- Cid, A. S., & Correa, T. (2019). Venturino: análise da variação de pressão em um tubo de Venturi utilizando Arduino e sensor de pressão. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 41(3). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0333>.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J., & Michtell, J. W. (2018). *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (9ª Ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Guerra, D., Plaisted, A., & Smith, M. (2005). A Bernoulli's Law Lab in a Bottle. *The Physics Teacher*, 43(7), 456–459. <https://doi.org/10.1119/1.2060646>.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2016). *Fundamentos de Física: Gravitação Ondas e Termodinâmica* (10ª Ed., Vol. 2). Rio de Janeiro: LTC.
- Ivanov, D., Nikolov, S., & Petrova, H. (2014). Testing Bernoulli's law. *Physics Education*, 49(4), 436–442. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/49/4/436>.
- Jesus, V. L. B. de, & Macedo Junior, M. A. V. (2011). Uma discussão sobre hidrodinâmica utilizando garrafas PET. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(1), 1–8. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100021>.
- Kamela, M. (2007). Thinking About Bernoulli. *The Physics Teacher*, 45(6), 379–381. <https://doi.org/10.1119/1.2768700>.
- Kireš, M. (2006). Mariotte Bottle with Side Openings. *The Physics Teacher*, 44(6), 388–389. <https://doi.org/10.1119/1.2336147>.
- Moraes, E. C. B., Baptista, H. C., Souza, A. B. De, & Santos, L. R. Dos. (2020). Investigação da variação de pressão em sistemas de vazão lateral através do princípio de Bernoulli. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, 2–5. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2019-0187>.
- Pavesi, L. (2019). Investigating Torricelli's Law (and More) with a 19th-Century Bottle. *The Physics Teacher*, 57(2), 106–108. <https://doi.org/10.1119/1.5088472>.
- Qin, R., & Duan, C. (2017). The principle and applications of Bernoulli equation. *Journal of Physics: Conference Series*, 916(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/916/1/012038>.
- Sommerfeld, A. (1950). *Mechanics of Deformable Bodies: Lectures on Theoretical Physics* (2ª Ed., Vol. 2). London: Academic Press.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2015). *Física II, Sears e Zemansky: Termodinâmica e ondas* (14ª Ed.). São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda.