



REVISTA CIENTÍFICA DA UMC

A MECÂNICA DOS FLUIDOS APLICADA AO PROJETO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA, ESGOTO E EFLUENTES INDUSTRIAIS

THE FLUID MECHANICS APPLIED TO THE PROJECT OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL EFFLUENTS TREATMENT PLANTS

Luciano Galdino

Resumo:

Este artigo apresenta como a mecânica dos fluidos pode ser utilizada no projeto de uma estação de tratamento de água, esgoto e efluentes industriais, através do dimensionamento de seus dois principais componentes de locomoção do fluido: as bombas elétricas e as tubulações. Proporciona ao estudante ou profissional da área os princípios básicos e todas as etapas para se realizar tal dimensionamento, além de transmitir a importância do estudo da mecânica dos fluidos exemplificado num projeto real e que a cada dia está se tornando mais comum pela necessidade da reutilização e consumo consciente da água devido à crise hídrica que diversas cidades do Brasil e do mundo estão enfrentando.

Palavras chave: Mecânica. Fluidos. Projeto. Tratamento. Água.

Abstract:

This article presents as fluid mechanics can be used in the project of a water, sewage and industrial effluent treatment plants, through the design of its two main components of movement of the fluid: electric pumps and pipes. Provides the student or professional area the basics and all the steps to perform such design, and convey the importance of the study of fluid mechanics exemplified a real project and that every day is becoming more common by the need to reuse and conscious consumption of water due to water crisis that several cities in Brazil and the world are facing.

Keywords: Mechanics. Fluids. Project. Treatment. Water.

Introdução

O problema de falta de água potável que alguns estados do Brasil enfrentam frequentemente impulsiona a criação de alternativas para se reaproveitar a água utilizada em processos industriais, esgotos e provenientes das chuvas. Para isso, diversas estações de tratamento de água, esgoto e efluentes industriais foram e estão sendo instaladas, seja por motivo de diminuição de gastos e/ou cumprimento de leis ou simplesmente por consciência ambiental.

As estações de tratamento de água (ETA) têm por objetivo tornar a água potável para o consumo humano, já as estações de tratamento de esgoto (ETE) objetivam tratar a água para retornar aos rios pelo menos da mesma forma com que foi retirada.

O tratamento de efluentes industriais tem por finalidade reutilizar a água para algum fim não potável ou até mesmo para serem descartadas sem contaminar os rios. Diversos processos industriais utilizam uma quantidade significativa de água e que são contaminadas durante esses processos. Exemplos clássicos são as indústrias alimentícias (principalmente as frigoríficas), indústria têxtil, indústria do papel e indústrias metalúrgicas (principalmente as de processos galvanizados).

O objetivo deste artigo é demonstrar como a mecânica dos fluidos pode ser utilizada na prática no projeto de uma estação de tratamento de efluentes, apresentando os conceitos básicos que se deve ter para executar tal projeto e as etapas que devem ser seguidas para que se consiga dimensionar uma bomba elétrica e escolher adequadamente as tubulações que servirão de conduto ao fluido.

O conteúdo abordado neste artigo serve para complementar o estudo de mecânica dos fluidos, proporcionando aos estudantes dessa disciplina uma aplicação numa situação que está ocorrendo com frequência nas indústrias, dando ênfase na importância de se compreender os conceitos e saber aplicar em um projeto real, fato esse que não é explorado nos livros didáticos desta disciplina.

O artigo apresenta brevemente os conceitos básicos de mecânica dos fluidos que se deve ter para dimensionar uma bomba elétrica, como massa específica, viscosidade, pressão, vazão, número de Reynolds, tipos de escoamentos e a equação de Bernoulli considerando as perdas de carga singular e distribuída. Para consulta são apresentadas tabelas de velocidades recomendadas de escoamento dos fluidos e de viscosidade dinâmica da água e do ar em função da temperatura, além do diagrama de Moody-Rouse para se determinar o coeficiente de carga distribuída (f).

Mecânica dos fluidos

A mecânica dos fluidos é uma área da engenharia que estuda o comportamento de líquidos e gases em equilíbrio estático e dinâmico, assim como em movimento não uniforme e é classificada como um tipo de mecânica aplicada, pois utiliza as mesmas leis fundamentais da mecânica, principalmente as leis de Newton e o princípio da conservação (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004).

Já Brunetti (2008, p. 1) define mecânica dos fluidos como “a ciência que estuda o comportamento físico dos fluidos, assim como as leis que regem este comportamento”.

Os fluidos são substâncias que fluem ou escoam com facilidade e não possuem forma própria. Dentre os fluidos estão os líquidos e gases, onde os líquidos tem volume bem definidos e os gases não (NUSSENZVEIG, 2004).

Propriedades básicas dos fluidos

Todos os fluidos, por formarem um meio contínuo e homogêneo, possuem uma propriedade muito importante denominada massa específica (ρ) que é a razão da massa (m) pelo volume (V) ocupado, conforme equação 1 (BRUNETTI, 2008).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Segundo Munson, Young e Okiishi (2004), multiplicando-se a massa específica pela aceleração da gravidade (g) local, obtêm-se o peso específico (γ) do fluido (equação 2).

$$\gamma = \rho g \quad (2)$$

Fialho (2003) define que a viscosidade é a característica mais importante dos fluidos e que representa a resistência oferecida ao seu escoamento, isto é, resistência ao movimento relativo de suas moléculas.

A viscosidade pode ser dinâmica (absoluta) ou cinemática. Segundo Brunetti (2008) “viscosidade dinâmica é a propriedade dos fluidos que permite equilibrar, dinamicamente, forças tangenciais externas quando os fluidos estão em movimento”. A viscosidade cinemática (ϑ) é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica (μ) e a massa específica (ρ), dada pela equação 3.

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

Conforme Bird, Stewart e Lightfoot (1987) a viscosidade dos gases aumenta com o aumento da temperatura, já nos líquidos, geralmente, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. A tabela 1 apresenta a viscosidade da água e do ar em função da temperatura.

Tabela 2: Viscosidade da água e do ar em centipoise (cP)¹ em função da temperatura para pressão de 1 atm.

Temperatura	Viscosidade (μ) da água (cP)	Viscosidade (μ) do ar (cP)
0	1,787	0,01716
20	1,0019	0,01813
40	0,6530	0,01908
60	0,4665	0,01999
80	0,3548	0,02087
100	0,2821	0,02173

Fonte: Bird, Stewart e Lightfoot (1987).

Nussenzveig (2004) define que a pressão (p) num fluido decresce com a altitude (h) e aumenta com a profundidade, sendo a taxa desta variação igual ao peso específico do fluido, conforme equação 4.

$$\frac{dp}{dh} = \rho g \quad (4)$$

A atmosfera é constituída de ar, que por sua vez é um fluido e, portanto, exerce uma pressão que diminui com a altitude chamada de pressão atmosférica (p_{atm}). Young e Freedmann (2008) destacam que a pressão atmosférica é a pressão exercida pela atmosfera terrestre e que varia em função da temperatura e altitude e que ao nível do mar possui o valor de 1 atm ($1,013 \times 10^5$ Pa). Eles apontam que a pressão manométrica é a pressão sem levar em consideração a pressão atmosférica (também chamada de pressão efetiva) e a pressão absoluta é a pressão total.

Já Brunetti (2008) destaca que se a pressão de um fluido for medida no vácuo é chamada de pressão absoluta (p_{abs}), já se for medida com relação à pressão atmosférica é chamada de pressão efetiva (p_{ef}). A equação 5 indica a relação entre essas pressões.

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{ef} \quad (5)$$

O fluido é chamado ideal quando o mesmo possuir viscosidade nula, isto é, escoar sem perder energia por atrito. Já um fluido incompressível é aquele que não altera seu volume quando se altera a pressão. Na prática, fluido ideal e incompressível não existe, mas essas hipóteses são utilizadas para simplificação de cálculos quando essas grandezas não forem as mais importantes no estudo (BRUNETTI, 2008).

Escoamento em tubulações

A vazão (Q) de um determinado fluido que escoar numa tubulação é definida como o volume (V) do fluido que atravessa uma secção em unidade de tempo (t), conforme equação 6 (BRUNETTI, 2008).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

O escoamento de um fluido em regime permanente (estacionário) é quando o campo de velocidade do fluido não varia com o tempo. Neste caso, e considerando que o fluido seja incompressível, a vazão pode ser calculada pela equação 7, pois o volume é o produto da área (A) pelo comprimento da tubulação e a velocidade (v) é a razão do comprimento pelo tempo (NUSSENZVEIG, 2004).

$$Q = Av \quad (7)$$

Segundo Brunetti (2008), o escoamento pode ser laminar ou turbulento e essa definição pode ser determinada através do número de Reynolds (equação 8). Se o resultado do cálculo do número de Reynolds for maior que 2400 o escoamento é classificado como turbulento, se for menor que 2000 é chamado de laminar, mas se for entre 2000 e 2400 é denominado de transição.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (8)$$

Um escoamento laminar é aquele no qual as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele no qual as partículas fluidas rapidamente se misturam, enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006, p.35).

A equação de Bernoulli para fluidos reais

Segundo Brunetti (2008), a equação de Bernoulli ou equação da energia para fluidos reais, que está representada pela equação 9, considera como hipóteses simplificadoras o regime permanente, sem trocas de calor, fluido incompressível e propriedades uniformes na secção do conduto.

$$H_1 + H_M = H_2 + H_p \quad (9)$$

Onde:

H_1 = Representa a energia total por unidade de peso na secção inicial do escoamento;

H_M = Representa a energia por unidade de peso retirada ou fornecida por uma máquina ao sistema;

H_2 = Representa a energia total por unidade de peso na secção final do escoamento;

H_p = Representa a energia dissipada entre a secção inicial e final em estudo.

Fox, Mcdonald e Pritchard (2006) definem que a energia mecânica total por unidade de peso (H) referente ao escoamento é representada pela equação 10.

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (10)$$

Onde:

$\frac{p}{\rho g}$ = energia de pressão por unidade de peso;

$\frac{v^2}{2g}$ = energia cinética por unidade de peso;

z = energia potencial por unidade de peso.

Brunetti (2008) enuncia que uma máquina introduzida num escoamento pode acrescentar energia (se for uma bomba) ou retirar energia (se for uma turbina). A representação no caso da bomba torna-se H_B e no caso da turbina H_T .

Conforme Santos (2007), a energia dissipada (H_p) é definida como a somatória das perdas nos trechos retos, chamada de perda distribuída (h_f), com as perdas por perturbações bruscas no escoamento como curvas, válvulas, registros..., chamada de perda singular (h_s), conforme equação 11.

$$H_p = \sum h_f + \sum h_s \quad (11)$$

Sendo que h_s é dada pela equação 12.

$$h_s = k_s \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

Sendo que k_s é o coeficiente de perda de carga singular, o qual é obtido através de consultas de tabelas.

Outra maneira de se calcular a energia dissipada ou perda de carga total é através da equação 13:

$$H_p = f \frac{(L_{real} + L_{eq})}{D_H} \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Onde:

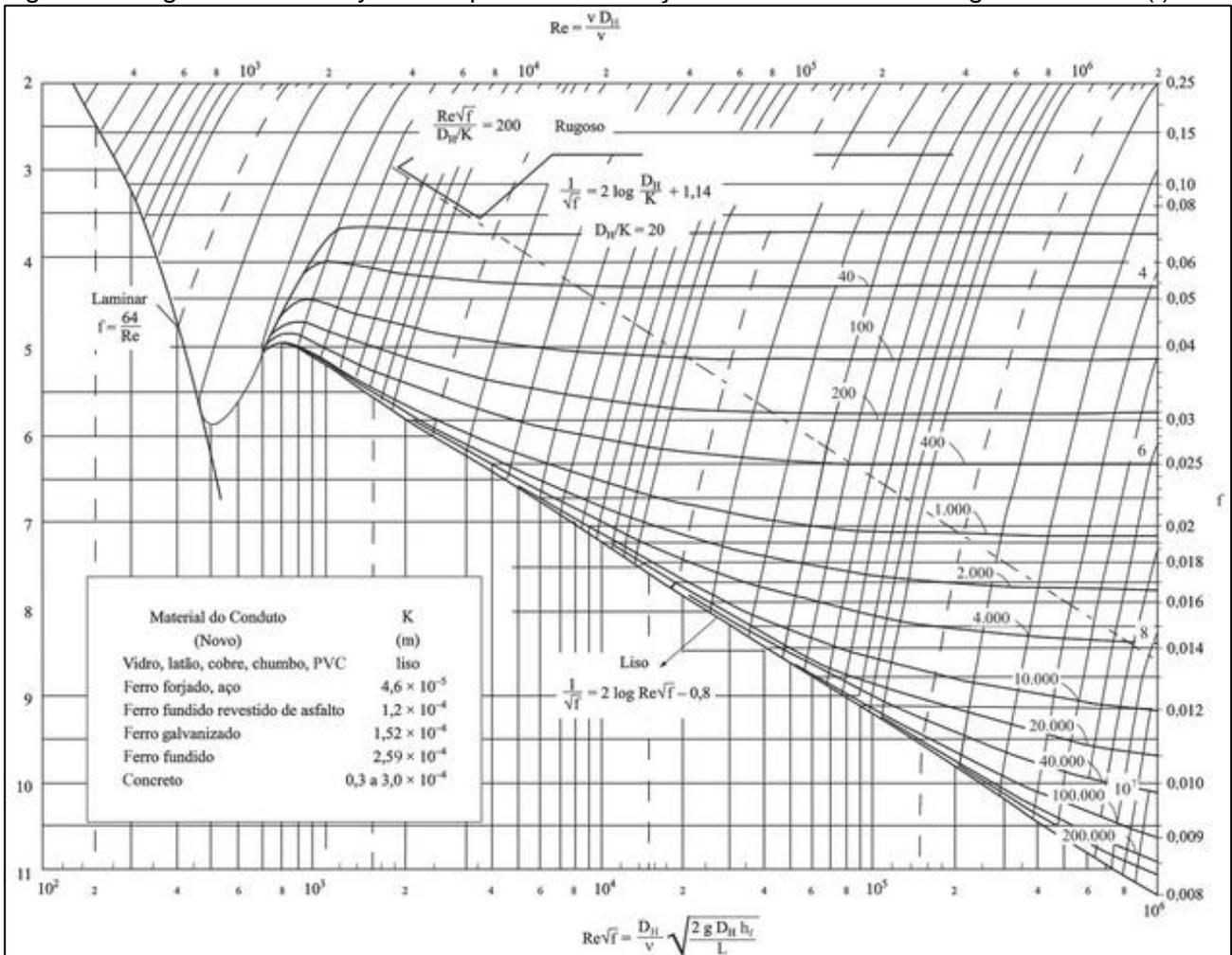
f = coeficiente da perda de carga distribuída, que é em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa do tubo e é obtido através do diagrama de Moody-Rouse (Figura 1);

L_{real} = Comprimento real da tubulação;

L_{eq} = Comprimento equivalente que, segundo Brunetti (2008, p185), “é o comprimento fictício de uma tubulação de secção constante de mesmo diâmetro, que produziria uma perda distribuída igual à perda singular da singularidade”. Os valores dos comprimentos equivalentes são tabelados e é recomendado consultar os valores fornecidos pelo fabricante do dispositivo que se deseja adquirir.

D_H = diâmetro hidráulico.

Figura 1: Diagrama de Moody-Rouse para determinação do coeficiente de carga distribuída (f).



Fonte: Brunetti (2008).

Outra grandeza importante decorrente do cálculo da perda de carga e determinação da energia retirada ou adicionada ao sistema pela inclusão de uma máquina é justamente a sua potência. A potência mecânica (N) fornecida ou adicionada pela máquina ao fluido é dada pela equação 14 (Brunetti, 2008).

$$N = \gamma Q H_M \quad (14)$$

Vale destacar que toda máquina possui uma perda de energia e, conseqüentemente, perda de potência decorrente de atritos de seu mecanismo de funcionamento, assim, para

determinar a potência dessa máquina é necessário considerar o seu rendimento (η), conforme descrito pela equação 15.

$$N = \frac{\gamma Q H_M}{\eta} \quad (15)$$

Dimensionamento das bombas elétricas numa estação de tratamento

Para iniciar um projeto de uma estação de tratamento de efluentes e/ou afluentes é fundamental elaborar um desenho da planta desse setor para que seja possível determinar os comprimentos das tubulações, tamanho dos reservatórios e desníveis, e isso de acordo com a necessidade da quantidade de água que deve ser tratada, podendo assim ser possível indicar quais componentes serão necessários, como bombas, válvulas, registros, cotovelos, sensores, entre outros. Após isso, é necessária a determinação dos materiais que serão utilizados nos condutos e reservatórios de acordo com as características químicas do fluido, através das propriedades físico-químicas dos materiais e análise dos custos.

Com a elaboração dessa planta e dos materiais dos condutos e reservatórios, é possível iniciar o dimensionamento das bombas através do cálculo da vazão (Q) pretendida através da equação 6 ($Q = \frac{V}{t}$), sendo que o projetista deverá estimar qual o tempo (t) ideal para executar um bombeamento de um reservatório para outro com volume (V).

Tendo definido a vazão, pode-se agora determinar o diâmetro da tubulação, e isso deve ser inicialmente realizado através da velocidade econômica, chegando-se ao chamado diâmetro econômico ou diâmetro ótimo.

Favetta (1998) define diâmetro econômico como aquele que diminui ao mínimo a soma dos custos da tubulação com a da energia. Já Santos (2007) destaca que esse diâmetro é economicamente convincente por ter o menor custo total de instalação, pois um diâmetro da tubulação maior que o diâmetro ótimo diminui as perdas devido à diminuição da velocidade e conseqüentemente a diminuição da potência do motor da bomba, mas por outro lado aumenta o custo da tubulação.

Perroni, Carvalho e Faria (2011) apontam que a velocidade econômica para escoamento de água pode variar de 0,67 m/s a 1,63 m/s para tubulações de aço galvanizado, sendo que para pvc esta variação é de 0,62 m/s a 1,97 m/s.

Já Santos (2007) apresenta a velocidade recomendada para as tubulações de acordo com vários tipos de fluidos, mas não destaca o material da tubulação (Tabela 2).

Tabela 2: Velocidades recomendadas para escoamento de fluidos em tubulações.

Fluido	Restrições	Velocidade (m/s)
Água	Sucção de bombas	1 a 2
Água salgada		1,5 a 2,5
Ar comprimido		15 a 20
Hidrocarbonetos líquidos	Sucção	1 a 2
	Recalque	1,5 a 2,5
Acetileno		20 a 25
Amônia líquida		2
Cloro líquido		1,5 a 2
Soda cáustica	0 a 30%	2
	30 a 50%	1,5
	50 a 75%	1,2
Cloreto de sódio		1,5 a 2
Cloreto de cálcio		1,5
Ácido sulfúrico		1 a 1,2

Fonte: Telles e Barros² (1978 apud SANTOS, 2007).

Obtendo-se o valor adequado da velocidade econômica (v_{ec}), utilizando-se a equação 16 e como já se tem o valor da vazão (Q) pretendida, pode-se encontrar o diâmetro econômico (D_{ec}) da tubulação.

$$D_{ec} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{ec}}} \quad (16)$$

Após o cálculo do diâmetro econômico o projetista deve consultar um catálogo de fornecedores de tubulações e verificar o diâmetro comercial (D) que está mais próximo do diâmetro econômico (D_{ec}) calculado. Selecionado o diâmetro encontrado comercialmente, deve-se calcular a velocidade através da equação 17.

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (17)$$

Vale destacar que está sendo levado em consideração tubulações com secções circulares e condutos totalmente preenchidos durante o escoamento, assim, o diâmetro hidráulico coincide com o diâmetro geométrico.

¹ TELLES, Pedro C. S.; BARROS, Darcy G. P. **Tabelas e Gráficos para Projetos de Tubulações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 1978.

Com a velocidade (v) de escoamento da água, o diâmetro do conduto (D) e sabendo-se a viscosidade do fluido, determina-se o tipo de escoamento (laminar ou turbulento) calculando-se o número de Reynolds (equação 8).

Tendo-se o número de Reynolds (Re) e sabendo-se o material dos condutos, pode-se determinar o coeficiente da perda de carga distribuída (f) através do diagrama de Moody-Rouse (Figura 1).

O próximo passo é determinar a perda de carga (H_p) que pode ser através do cálculo da perda de carga singular h_s (equações 11 e 12) ou através do comprimento equivalente (L_{eq}) referente à perda singular devido à existência de válvulas, registros, curvas e outros. Esse comprimento equivalente deve ser obtido através de tabelas e catálogos dos fabricantes em que se deseja adquirir esses dispositivos, onde o comprimento equivalente total é a soma dos comprimentos equivalentes de cada dispositivo. Através da equação 18 calcula-se a perda de carga (H_p), uma vez que já se tem definido o comprimento real (L_{real}) de toda a tubulação referente ao bombeamento e também o diâmetro geométrico (D) da tubulação.

$$H_p = f \frac{(L_{real} + L_{eq}) v^2}{D 2g} \quad (18)$$

Utilizando a equação da energia (equações 19 e 20), calcula-se a carga ou altura manométrica da bomba (H_B) (energia por unidade de peso fornecida ao sistema), sendo que já se deve ter conhecimento dos desníveis entre o ponto inicial e o ponto final onde se deseja bombear a água, assim como as velocidades e pressões nestes pontos.

$$H_1 + H_B = H_2 + H_p \quad (19)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_p \quad (20)$$

Vale lembrar que as equações 19 e 20 adotam como hipóteses simplificadoras o regime permanente, sem trocas de calor, fluido incompressível e propriedades uniformes na seção do conduto.

Tendo o valor de H_B , agora é só calcular a potência N_B da bomba (equação 21), sendo que o rendimento (η) deve ser determinado pelo fabricante da bomba, retirado de algum trabalho acadêmico ou livro didático.

$$N_B = \frac{\gamma Q H_B}{\eta} \quad (21)$$

Conclusão

Neste artigo foi apresentado como determinar a potência de uma bomba elétrica através da equação de Bernoulli e também o cálculo do diâmetro dos condutos através da velocidade econômica, pois são componentes fundamentais para o bom funcionamento de uma estação de tratamento de água, esgoto e efluentes industriais. Vários conceitos da mecânica dos fluidos foram abordados, pois servem de embasamento para esse tipo de dimensionamento. Esse material serve de consulta para profissionais da área e principalmente para os estudantes dessa disciplina obterem contato com uma aplicação real e atual com o objetivo de complementar o conhecimento de mecânica dos fluidos.

Referências

- BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Erwin N. **fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento**. México: Repla, 1987.
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- FAVETTA, G. M. **Estudo Econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central**. 1998. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- FIALHO, Arivelto B. **Automação hidráulica: projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2003.
- FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro, 2006.
- MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. v2.
- PERRONI, Bruno L. T., CARVALHO, Jacinto A., FARIA, LESSANDRO C. **Velocidade econômica de escoamento e custos de energia de bombeamento**. Revista Eng. Agríc., Jaboticabal, v.31, n.3, p.487-496, 2011
- SANTOS, Sérgio L. **Bombas & Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LCTE, 2007
- YOUNG, Hugh D.; FREEDMANN, Roger A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12 ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008.