

Dimensionamento otimizado de um sistema de bombeamento utilizando o software Scilab

Optimized sizing of a pumping system using Scilab software

Natália Vernillo¹; Roberta Marisa de Moraes Silva²; Davi Leonardo de Souza³

¹Aluna do Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid: 0009-0001-7626-0322 Email: nataliavernillo@gmail.com

²Aluna do Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid: 0009-0003-7034-2575 E-mail: robertamarisa@hotmail.com

³Professor da Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid: 0000-0002-1995-9057 Email: davi.souza@uftm.edu.br

RESUMO: As mudanças climáticas configuram, hoje, um dos maiores desafios no que se diz respeito à disponibilidade de recursos hídricos direcionados ao cultivo de alimentos e matérias-primas de origem vegetal que a população mundial tanto necessita. A cana-de-açúcar, em razão de seu elevado valor agregado para a produção de diversos produtos e cujo acúmulo de sacarose se deve, principalmente, a uma dosagem perfeita de água, trouxe à tona a necessidade em se obter novas estratégias de irrigação, visando, assim, uma gestão mais sustentável, eficiente e econômica de consumo água nesse setor. Como alternativa a esse desafio, destacou-se a irrigação por gotejamento que permitiu não só um controle mais preciso da dosagem de água como também nutrientes essenciais para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Aproveitando-se disto, uma usina sucroalcooleira do interior do estado de São Paulo, cuja identidade será preservada, realizou vários investimentos para implementação desse sistema em suas fazendas e um desses projetos será abordado detalhadamente no que se diz respeito ao dimensionamento de toda a rede tubulação que envolve o sistema de bombeamento, desde a captação de água até a descarga em um tanque de armazenamento, responsável pelo abastecimento do gotejo, utilizando-se de uma bomba já pré-dimensionada e respeitando as especificações definidas pelo cliente para o presente trabalho. Além disso, contou-se com o auxílio do *software* livre Scilab para implementação do procedimento de dimensionamento da tubulação e bombeamento, como ferramenta extra, além do desenvolvimento no Excel.

Palavras-chave: água; irrigação; gotejo; sucção; recalque.

ABSTRACT: *Climate change represents, today, one of the greatest challenges about the availability of water resources for the cultivation of food and raw materials of plant origin that the world's population so badly needs. Sugarcane, due to its high added value for the production of several products and whose accumulation of sucrose is mainly due to a perfect dosage of water, brought to light the need to obtain new irrigation strategies, thus aiming at a more sustainable, efficient and economical management of water consumption in this sector. As an alternative to this challenge, drip irrigation stood out, which allowed not only a more precise control of water dosage, but also essential nutrients for the development of sugarcane. Taking advantage of this, a sugar and alcohol plant in the interior of the state of São Paulo, whose identity will be preserved, made several investments to implement this system on its farms and one of these projects will be discussed in detail with regard to the dimensioning of the entire piping network. which involves the pumping system, from water collection to discharge into a storage tank, responsible for supplying the dripping, using a pre-dimensioned pump and respecting the specifications defined by the client for this work. In addition, the free software Scilab was used to implement the piping and pumping sizing procedure, as an extra tool, in addition to development in Excel.*

Keywords: water; irrigation; drip; suction; discharge.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, cujo nome científico é dado por *Saccharum officinarum*, compõe uma das culturas mais antigas e devido à sua elevada adaptabilidade ao clima e solo brasileiros, foi a base da economia colonial durante muito tempo, fazendo do açúcar, o produto representante da primeira grande riqueza agrícola e industrial do Brasil; influenciando diretamente na formação da cultura brasileira (Yogitha *et al.*, 2020).

Seu alto valor econômico somado a pesquisa e desenvolvimento de produtos e energias mais sustentáveis fez com que os derivados da cana-de-açúcar fossem muito além do melaço, garapa, cachaça e açúcar, passando a ganhar notoriedade na produção de combustíveis, como o etanol hidratado de 1ª e 2ª geração e anidro, e energia a partir do bagaço misturado com palha. Além disso, a vinhaça e a torta de filtro residuais ganharam elevada aplicabilidade no processo de fertilização da própria cana e outras culturas (Schmidt Filho *et al.*, 2016).

O cenário brasileiro frente a safra canavieira em 2022 revelou uma maior produção de etanol até meados de junho, ditada pelo preço superior do etanol em relação ao açúcar, o que não acontecia desde o ano de 2019. Como previsão para a próxima safra (2023/2024), a produção de açúcar promete oferecer melhores retornos, recolocando o Brasil como maior produtor e exportador de açúcar no mundo (Vital, 2023).

Tal previsão decorre de uma maior quantidade de cana disponível para moagem, uma vez que as chuvas em 2022 serviram de recuperação após 3 anos oscilando entre níveis bem abaixo da média (Vital, 2023).

Com a escassez de chuvas e a emergente necessidade de manter as fazendas de cana-de-açúcar irrigadas, o gotejamento surgiu como alternativa, apoiado não só na economia de recursos hídricos como também de insumos agrícolas, promovendo, assim, o máximo rendimento do cultivo (Carr; Knox, 2011; Dalri *et al.*, 2008; Lamm *et al.*, 2012).

Segundo o Jornal da Cana (2021), além de entregar um volume ideal de água e nutrientes, conforme o estágio de crescimento da planta, a irrigação por gotejamento evita os processos de evaporação e lixiviação, minimiza a dependência climática e permite a utilização de 100% da área agricultável.

Tal sistema é composto por tubulações adequadas ao tipo de líquido empregado, emissores, denominados gotejadores, conjunto de motobomba, filtros, válvulas, manômetros, sistema de automação e sistema de injeção de fertilizantes. Por operar à baixas pressões, oferece também uma economia energética (Esteves *et al.*, 2012).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo dimensionar, de forma otimizada, uma adutora para o bombeamento de água de um córrego do Rio Sapucaí até um tanque construído para abastecer o sistema de irrigação por gotejo de uma usina sucroalcooleira, localizada no município de São Joaquim da Barra, interior do estado de São Paulo. Também serão definidos o material e os diâmetros das tubulações de sucção e recalque, respeitando uma vazão desejada de 200 m³/h e uma potência consumida limitada a 25 CV, pressupondo o reaproveitamento da estrutura previamente instalada.

Por fim, será realizada a simulação do processo de dimensionamento, utilizando o *software* Scilab, visando maior praticidade na obtenção dos resultados quando comparado ao Excel.

REFERENCIAL TEÓRICO

Bombas centrífugas

As bombas centrífugas consistem em máquinas que transformam energia mecânica, fornecida por uma fonte motora, em energia hidráulica tanto na forma de energia cinética, potencial e de pressão (Araújo; Araújo, 2019).

Dentre as aplicações mais comuns estão redes de abastecimento de água, sistemas de irrigação, refrigeração industrial, combate a incêndio, tratamento de água, bombeamento de produtos químicos, etc (Santos, 2019).

Macintyre (1986) afirma que um dos requisitos para o funcionamento da bomba centrífuga é o preenchimento total da carcaça com o fluido a ser bombeado, no momento da partida, fenômeno este conhecido por *escorva*, uma vez que o movimento centrífugo do rotor com as pás impulsiona o fluido para uma região de duas pressões distintas.

A zona de baixa pressão é responsável por succionar as partículas advindas da entrada, ao passo que a região de alta pressão, possibilita que o material escoado vença as perdas de cargas impostas pelos acessórios e pela tubulação (Macintyre, 1986).

O transporte inicia-se com o fluido sendo succionado através do bocal da bomba, cuja pressão manométrica local pode ser positiva ou negativa (vácuo) se superior ou inferior à atmosférica, respectivamente. A partir daí, o fluido será encaminhado a um ou mais rotores que o cedem energia cinética a qual será convertida em energia potencial de pressão (Fox; McDonald; Pritchard, 2014).

Analogamente, a saída do fluido ocorre pelo bocal de recalque, porém, a energia a qual será cedida a ele passa a ser fruto da diferença de pressão entre a sucção e a descarga da bomba. Tal energia é conhecida como altura manométrica total e é em função dela que a elevação, pressurização ou transferência de fluidos faz-se possível (Fox; McDonald; Pritchard, 2014).

Curvas características das bombas

A curva característica da bomba é fornecida pelo fabricante utilizando-se bancos de prova equipados para tal serviço e são empregadas para descrever o comportamento operacional da bomba em determinadas condições de vazão e altura manométrica (Gomes, 2017).

Com auxílio dessa curva é possível não só analisar e escolher a bomba ideal para cada tipo projeto como também verificar se ela está operando dentro das tolerâncias recomendadas, no intuito de maximizar a eficiência desta máquina e evitar gargalos no futuro (Gomes, 2017).

Já a curva característica de instalação da bomba, também chamada de curva do sistema, caracteriza-se como a energia necessária, por unidade de peso, fornecida a um fluido em função de sua vazão. Em outras palavras, representa a altura manométrica total correspondente a cada vazão, dentro de uma determinada faixa de operação do sistema (Takami, 2011).

A curva característica da bomba tende a um comportamento decrescente, visto que, no momento da partida da bomba, o fluido começa a escoar conforme aumenta-se a abertura do registro do recalque e a capacidade de elevação diminui; enquanto que, a curva

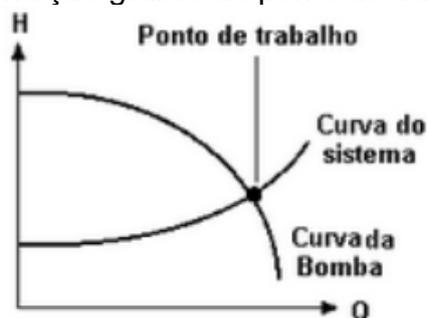
do sistema apresenta um comportamento ascendente, uma vez que a perda de carga é proporcional ao quadrado da velocidade, e esta é diretamente proporcional a vazão, ou seja, a perda de carga aumenta à medida que aumenta a vazão do sistema (LENGSFELD *et al.*, 2005).

Ponto de trabalho

O ponto de trabalho ou ponto de operação da bomba, conforme indicado na **Figura 1**, retratada a condição operacional de uma bomba de um determinado sistema e é obtido através do cruzamento da curva característica de instalação com a curva característica da bomba (Takami, 2011).

Isso significa que neste ponto a bomba é capaz de fornecer ao fluido a carga manométrica precisamente igual àquela que o fluido necessita para Percorrer a instalação hidráulica com uma vazão Q em regime de escoamento permanente (MACINTYRE, 1986).

Figura 1. Representação gráfica do ponto de trabalho do sistema.



Fonte: Baptista e Lara, 2002.

Cavitação e NPSH

A cavitação é um fenômeno físico de vaporização, muito complexo e frequentemente encontrado em sistemas de máquinas hidráulicas, operando com líquidos, como o caso de uma bomba centrífuga (Coelho, 2006).

Na ocorrência de cavitação, há uma intensa formação de bolhas de vapor na zona de baixa pressão da bomba e após um restabelecimento dessa pressão, essas bolhas de vapor implodem com um micro choque mecânico de elevada intensidade (Simões, 2020).

Tal fenômeno interfere diretamente na lubrificação da máquina, podendo trazer grandes danos ao rotor da bomba em função do desgaste consequente de um maior esforço físico, além de considerável ruído na tubulação (Simões, 2020).

Sendo assim, um importante parâmetro que auxilia na verificação do desempenho de bombas centrífugas é o NPSH (*Net Positive Suction Head*), que pode ser compreendido como a pressão mínima em termos absolutos, em metros de coluna de água, acima da pressão de vapor do fluido, a fim de evitar a formação destas bolhas de vapor e, então, a ocorrência da cavitação na sucção da bomba (Lengsfeld *et al.*, 2005).

Segundo Lengsfeld *et al.* (2005), para efeito de estudo e definição, o NPSH pode ser dividido entre requerido e disponível.

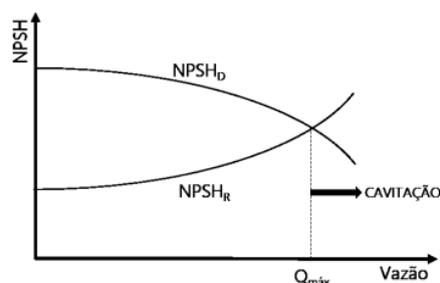
O NPSH disponível diz respeito à uma característica da instalação em que a bomba opera e da pressão disponível do líquido no lado de sucção da bomba, podendo ser calculado através de uma expressão matemática (Oliveira, 2017).

Em contrapartida, o NPSH requerido representa a energia em altura absoluta do líquido na sucção da bomba acima da pressão de vapor deste líquido, na temperatura de bombeamento, referida à linha de centro da bomba; por se tratar de uma característica própria da bomba, obrigatoriamente deve ser obtida de modo experimental nas bancadas de teste dos fabricantes (Oliveira, 2017).

Dessa forma, em termos práticos de projeto, uma vez que a energia disponível se iguale ou exceda os valores de NPSH requerido, garante-se a não ocorrência de vaporização do líquido, evitando por consequência problemas decorrentes da cavitação. Usualmente, o NPSH disponível deve ser superior ao requerido em pelo menos 10 a 15% e nunca inferior a 0,5 m (Lengsfeld *et al.*, 2005).

Na **Figura 2**, é possível observar e assim compreender melhor o efeito da vazão sobre o NPSH.

Figura 2. Representação do efeito da vazão sobre o NPSH.



Fonte: Oliveira, 2017.

Pela análise da **Figura 2** é importante notar que o ponto de intersecção entre o NPSH disponível e requerido corresponde à vazão máxima admitida pelo sistema para que a cavitação não aconteça.

Diâmetro econômico

Um dos principais objetivos de todo e qualquer projeto se resume a atender as necessidades daquilo que foi proposto acarretando o menor custo possível, seja ele de instalação ou manutenção por ano (Gama; Souza; Callado, 2019).

Sendo assim, para a determinação do diâmetro de tubulação que satisfaça tal exigência em sistemas adutores, é preciso levar em consideração determinados parâmetros e, principalmente, a disponibilidade de diâmetros de tubos comerciais para sua escolha (Corrêa, 2016).

Além disso, nesse contexto, faz-se necessário ter em mente a clara separação do custo da tubulação a ser instalada, comumente denominado de *capex*, o qual compreende os custos fixos ou de depreciação do investimento inicial e do custo operacional do sistema, comumente denominado *opex*, o qual compreende a energia gasta no bombeamento do fluido (Corrêa, 2016).

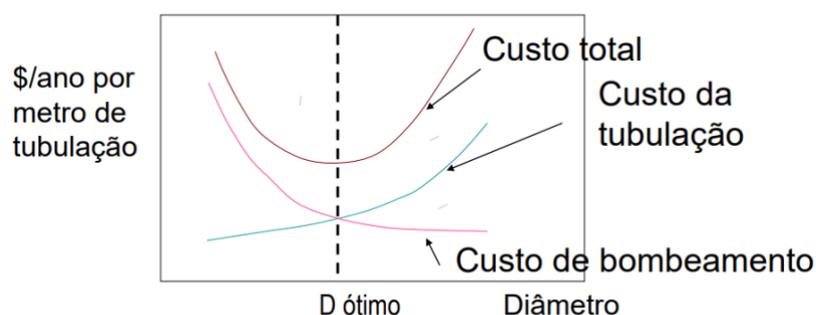
Vale dizer também que o *capex* aumenta proporcionalmente o diâmetro, uma vez que diâmetros maiores demandam, por consequência, uma maior quantidade de material,

ao passo que o *opex* diminui com o aumento do diâmetro da tubulação devido a uma menor resistência ao escoamento do fluido.

Dessa forma, os custos fixos quando somados aos operacionais apresentará um valor mínimo, que será aquele responsável por minimizar os custos totais, configurando o que se entende por diâmetro econômico (Denn, 1980).

A **Figura 3** compõe uma representação visual da definição de diâmetro econômico.

Figura 3. Representação visual do diâmetro econômico (ótimo).



Fonte: Corrêa, 2016.

Software Scilab

Nas últimas décadas, as simulações computacionais ganharam destaque no setor industrial por se tratarem de ferramentas que possibilitam, com auxílio de técnicas matemáticas, analisar e controlar o funcionamento de um ou mais processos específicos (Freitas Filho, 2008).

Desse modo, o *software* Scilab é considerado uma das ferramentas computacionais mais utilizadas nesse ambiente, cujo desenvolvimento data na década de 90 por pesquisadores do INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatic) e do ENPC (École des Ponts ParisTech) (Silva; Cunha, 2006).

Este *software*, até o presente momento, é gratuito e caracteriza-se pelo seu alto rendimento em resolver problemas matemáticos com uma linguagem mais simples (Silva; Cunha, 2006).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Equacionamento base

Para o cálculo da velocidade média de escoamento em [m/s], no interior de uma tubulação cilíndrica, utilizou-se a **Equação 1**, resultante da Equação da Continuidade para fluidos homogêneos, incompressíveis e de propriedades constantes.

$$V = \frac{4 * Q / 3600}{\pi * D^2} \quad (1)$$

Sendo, Q a vazão do fluido em [m³/h] e D o diâmetro interno da tubulação em [m].

Para o cálculo do número de Reynolds, utilizou-se da sua definição proposta por Osborne Reynolds no final do século XIX, representada pela **Equação 2** e interpretada como a razão entre forças inerciais (ρv) e viscosas (μ/L).

$$Re = \frac{v * D}{\vartheta} \quad (2)$$

Sendo, ϑ a viscosidade cinemática do fluido em [m^2/s].

Como observação, faz-se necessário citar que as **Equações 1 e 2** foram retiradas do livro Fenômenos de Transporte, escrito por Bird, Stewart e Lightfoot (2004).

Para o cálculo do fator de atrito, foi utilizada a **Equação 3**, proposta por Serghides (1984), a qual configura uma otimização mais precisa em relação a Equação de Coolebroke-White.

$$F = \left[A - \frac{(B - A)^2}{A - 2 * B + C} \right]^{-2} \quad (3)$$

$$A = -2 * \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{12}{Re} \right) \quad (3a)$$

$$B = -2 * \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51 * A}{Re} \right) \quad (3b)$$

$$C = -2 * \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51 * B}{Re} \right) \quad (3c)$$

Para os cálculos da perda de carga localizada e de um estreitamento brusco, utilizou-se as **Equações 4 e 5**.

$$Hp_L = K * \frac{v^2}{2 * g} \quad (4)$$

$$K = \frac{4}{9} * \left(1 - \frac{B}{A} \right) \quad (5)$$

Sendo, K um coeficiente adimensional obtido experimentalmente, g a aceleração da gravidade em [m/s^2] e B/A a razão entre a menor e a maior área, respectivamente.

Para o cálculo da perda de carga distribuída, utilizou-se a **Equação 6**, proposta por Darcy-Weisbach (1845).

$$Hp_D = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (6)$$

Sendo, f o fator de atrito e L o comprimento total dos trechos retos em [m].

Para a verificação da ocorrência de cavitação da bomba, a partir da pressão estática absoluta como parâmetro, utilizou-se a **Equação 7**, proposta por Simões (2020).

$$P_{e_{abs}} = P_{atm} - \frac{\gamma}{1000} \left(\frac{v^2}{2g} + H_{geo} + H_{pL} + H_{pD} \right) \quad (7)$$

Sendo, P_{atm} a pressão atmosférica no município em [kgf/cm²], γ o peso específico do fluido em [kgf/dm³] e H_{geo} a altura geométrica em [m].

Para o cálculo do NPSH em [m] (*Net Positive Suction Head*) disponível na fase de projeto, utilizou-se a **Equação 8**.

$$NPSH_d = \frac{P_{rs} + P_{atm} - p_v}{\gamma} * 10 \pm H_{geo} - H_p \quad (8)$$

Sendo, P_{rs} a pressão no reservatório de sucção em [kgf/cm²] e p_v a pressão de vapor do fluido em [kgf/cm²].

Para o cálculo das alturas de sucção (H_s) e descarga (H_d), utilizou-se as **Equações 9 e 10**.

$$H_s = \pm H_{geo} + \frac{P_{rs}}{\gamma} - H_{ps} + \frac{v_{rs}^2}{2g} \quad (9)$$

$$H_d = H_{geo} + \frac{P_{rd}}{\gamma} + H_{pd} + \frac{v_{rd}^2}{2g} \quad (10)$$

Sendo, P_{rd} a pressão do reservatório de descarga em [kgf/cm²] e v_{rs}/v_{rd} as velocidades médias de escoamento nas tubulações de sucção e descarga em [m/s].

Para o cálculo da altura manométrica total, utilizou-se a **Equação 11**.

$$H = H_d - H_s \quad (11)$$

Por fim, para o cálculo da potência consumida pela bomba, utilizou-se a **Equação 12**.

$$P = \frac{\gamma * Q * H}{270 * \eta} \quad (12)$$

Sendo, γ o peso específico do fluido em [kgf/dm³], Q a vazão de fluido em [m³/h], H a altura manométrica total em [m] e η o rendimento obtido através do catálogo da bomba do fornecedor.

Como observação, faz-se necessário mencionar que as **Equações 6, 8, 9, 10, 11 e 12** foram todas retiradas do “Manual de Treinamento” elaborado pela fabricante de bombas KSB, publicado por Lengsfeld *et al.* (2005).

Dados de projeto: motor

O motor escolhido para compra foi aquele fabricado pela WEG, de aplicação geral, cujo modelo é o W22 com eficiência IR3 premium, rotação de 1750 rpm e potência de 25

CV, respeitando o limite máximo imposto pelo cliente a fim de se suportar a estrutura previamente instalada. É trifásico, 220/380/440 V, 4 polos com pés e sem flanges.

Dados de projeto: terreno

Para a sucção, mediu-se 7,5 m de trechos retos e 4,5 m de altura geométrica, ambos com folga, estimando-se também a presença de 1 curva de 90° e 1 válvula do tipo borboleta na linha.

Para o recalque, mediu-se 144 m de trechos retos e 5 m de altura geométrica, ambos também com folga; estimando-se também a presença de 4 curvas de 90° e duas válvulas, uma do tipo borboleta e outra de retenção na linha.

Além disso, através da **Tabela 1** definiu-se a pressão atmosférica para a altitude do município de São Joaquim da Barra, equivalente a 625 m, segundo o programa *Google Earth Pro* para as dadas coordenadas da Usina em questão.

Tabela 1. Variação da pressão atmosférica segundo a altitude.

Altitude [m]	Pressão [mmHg]	Altitude [m]	Pressão [mmHg]
0	760	1000	674
200	742	1200	658
400	724	1400	642
600	707	1600	627
800	690	1800	612

Fonte: Galvani, 2018.

Dados de projeto: fluido

Como fluido, tem-se água mineral líquida e dentre suas propriedades destacou-se para uma temperatura de 30°C, segundo Houghtalen, Hwang e Akan (2012), massa e peso específicos iguais a 996 kg/m³ e 9771 N/m³; pressão de vapor equivalente a 0,041831 atm e por fim, viscosidade cinemática dada por 0,800 x 10⁻⁶ m²/s.

Procedimento iterativo

Como procedimento de cálculo, recorreu-se, inicialmente, a uma estratégia iterativa dividida entre sucção, recalque e verificação da potência consumida.

Para a sucção, utilizou-se como critério de análise os conceitos de NPSH (requerido e disponível) e cavitação já apresentados, relacionando-os com a vazão através de um gráfico, como já mostrado na **Figura 2**.

Para a sua obtenção, definiu-se um diâmetro externo da tubulação em polegadas, para um determinado range de vazão, cujos valores em milímetros, bem como o desconto da espessura de parede para cada um deles, foram extraídos da **Tabela 2** seguindo a norma usualmente adotada pela Usina, conforme o material escolhido.

Tabela 2. Tubos de aço de acordo com as normas ANSI B.36.10 e B.36.19.

D [pol]	De [mm]	5S [mm]	10S [mm]	40/40S [mm]
4	114,30	2,11	3,05	6,02
6	168,28	2,77	3,40	7,11
8	219,08	2,77	3,76	8,18
10	273,05	3,40	4,19	9,27

Fonte: Vedatech, 2012.

A partir desse chute, calculou-se parâmetros como velocidade (**Equação 1**), Reynolds (**Equação 2**), fator de atrito (**Equação 3**), perdas de carga localizada e distribuída (**Equações 4 e 6**) para então obtenção da perda de carga da sucção (**Equação 9**).

Como nota, é válida a ressalva de que o cálculo da perda de carga localizada foi feito utilizando-se do método dado pelo coeficiente empírico K, cujos valores encontram-se na **Tabela 3**.

Tabela 3. Valores do coeficiente K obtido experimentalmente.

Acessório/Válvula	K	Acessório/Válvula	K
Curva de 90° raio longo	0,40	Válvula globo	10,00
Curva de 90° raio curto	1,50	Válvula gaveta	0,20
Curva de 45° raio longo	0,20	Válvula angular	5,00
Curva de 45° raio curto	0,40	Tê passagem direta	0,60
Curva de 30°	0,10	Tê passagem lateral	1,30
Válvula pé	1,75	Tê saída bilateral	1,80
Válvula de retenção	2,50	Crivo	0,40
Válvula borboleta	0,30	Saída	0,50

Fonte: Lengsfeld *et al.*, 2005.

Além disso, foram contabilizadas as reduções de tubulação entre o diâmetro chutado e o diâmetro do bocal da bomba, utilizando a **Equação 5**.

De posse de todos esses valores, calculou-se, para cada uma das respectivas vazões, os valores de NPSH disponível, possibilitando a construção das curvas conforme o valor do diâmetro chutado.

Para o recalque, a metodologia para determinação da perda de carga da linha segue os mesmos passos que a sucção, porém, como trata-se de um cálculo interdependente, fez-se necessária a fixação de uma tubulação de sucção para análise dos diâmetros de tubulação.

Por fim, com cálculo da altura manométrica total, por meio da **Equação 11**, consultou-se o rendimento na curva da bomba fornecida pelo fabricante, possibilitando, enfim, a verificação do valor da potência pela **Equação 12**.

Simulação no software Scilab

Visando maior praticidade de cálculo do dimensionamento descrito acima, recorreu-se ao *software* livre Scilab para construção de um código que retornasse os diâmetros de tubulação de sucção e recalque como alternativa ao uso de ferramentas de VBA via Excel.

Sendo assim, fez-se necessário a inserção dos dados, em formato txt, das normas ANSI B.36.10 e B.36.19, já apresentadas na **Tabela 2** e também das informações

fornecidas pelo fabricante, que neste caso foram extraídas do catálogo eletrônico, exatamente como foi mencionado anteriormente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Escolha da bomba

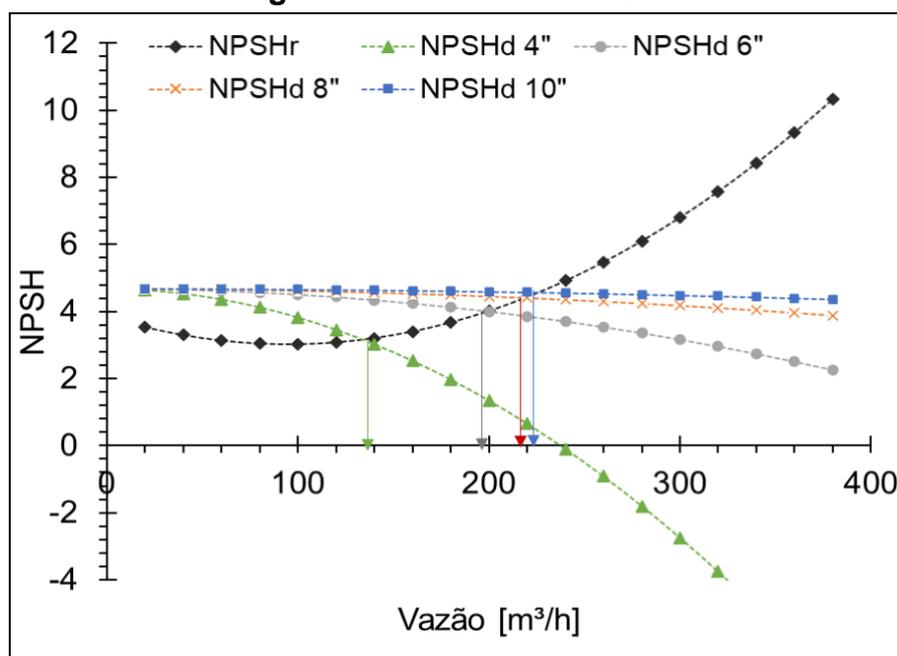
Conforme as condições do terreno, foi pré dimensionada uma bomba centrífuga operando com sucção positiva ou “não afogada”, ou seja, a bomba fica posicionada acima do reservatório de sucção.

Como resultado, foi selecionada uma bomba centrífuga modelo ITAP 125-260 fabricada pela IMBIL com um diâmetro de rotor igual a 228 mm e rotação de 1750 rpm, cuja linha é comumente aplicada em usinas, destilarias e sistemas de irrigação.

Sucção

Após aplicação do procedimento metodológico descrito para a sucção, obteve-se a **Figura 4**, a qual relaciona o NPSH com a vazão limite para ocorrência de cavitação.

Figura 4. NPSH versus vazão.



Fonte: Dos autores, 2024.

Pela análise da **Figura 4**, observa-se que para um diâmetro de sucção igual a 4", a vazão limite para que não ocorra cavitação é equivalente a algo próximo de 137 m³/h, que é bem abaixo daquela desejada, 200 m³/h.

Além disso, para vazões superiores a 240 m³/h o NPSH está vinculado a valores negativos, o que seria impraticável.

Seguindo com a análise, para um diâmetro de 6" a vazão limite passa a ser exatamente a vazão desejada o que também acaba não sendo muito viável, uma vez que

os projetos na sua grande maioria não correspondem 100% a realidade e, sendo assim, qualquer oscilação, nesse caso, seria suficiente para comprometê-lo.

Já para os diâmetros de 8" e 10" já há a garantia de uma vazão de trabalho próxima dos 200 m³/h contando até com uma pequena folga, porém, caso fosse de interesse do cliente aumentar essa vazão no futuro é preciso um outro estudo de viabilidade.

Para contornar tal situação uma boa alternativa seria a associação de uma bomba em paralelo, pois nem sempre é possível encontrar no mercado uma bomba que funcione no ponto de trabalho desejado ou próximo ao ponto de máximo rendimento, fazendo com que essas associações possam levar a um melhor desempenho operacional do sistema (Gaio; Monteiro, 2005).

Para uma associação em paralelo há promoção do recalque do fluido para uma única tubulação, de modo que para cada altura total de bombeamento a vazão será resultante da soma das vazões individuais de cada uma (Denículi, 2005; Gaio; Monteiro, 2005; Azevedo Netto *et al.*, 1998).

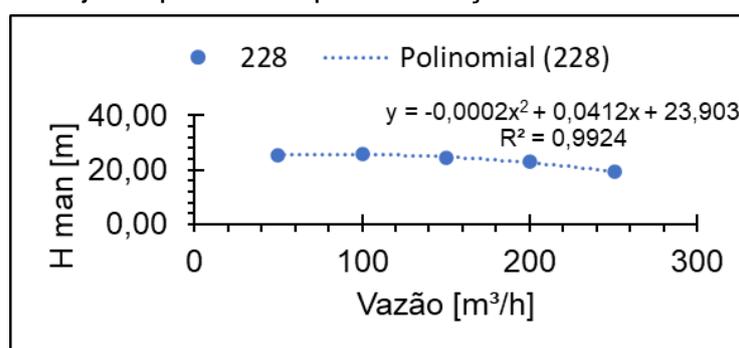
Portanto, contando que a vazão desejada segue sendo 200 m³/h e os diâmetros de 8" e 10" atendem essa necessidade e, pensando no custo da tubulação, é mais viável trabalhar com 8" na sucção.

Recalque

Visando a obtenção dos respectivos pontos de trabalho para cada um dos diâmetros em análise, foi preciso definir a curva da bomba para o rotor de 228 mm utilizando-se dos dados fornecidos pelo fabricante através do catálogo eletrônico disponível em <https://ce.imbil.com.br/open.do?sys=IMB&action=openform&formID=464570603>.

Para isso, uma vez que não havia a opção de exportar os dados da curva disponibilizada pelo fabricante, definiu-se 5 pontos espaçados em aproximadamente 50 m³/h de vazão e aplicou-se um ajuste polinomial de ordem 2, cujos resultados estão representados através da **Figura 5**.

Figura 5. Ajuste polinomial para obtenção da curva da bomba.

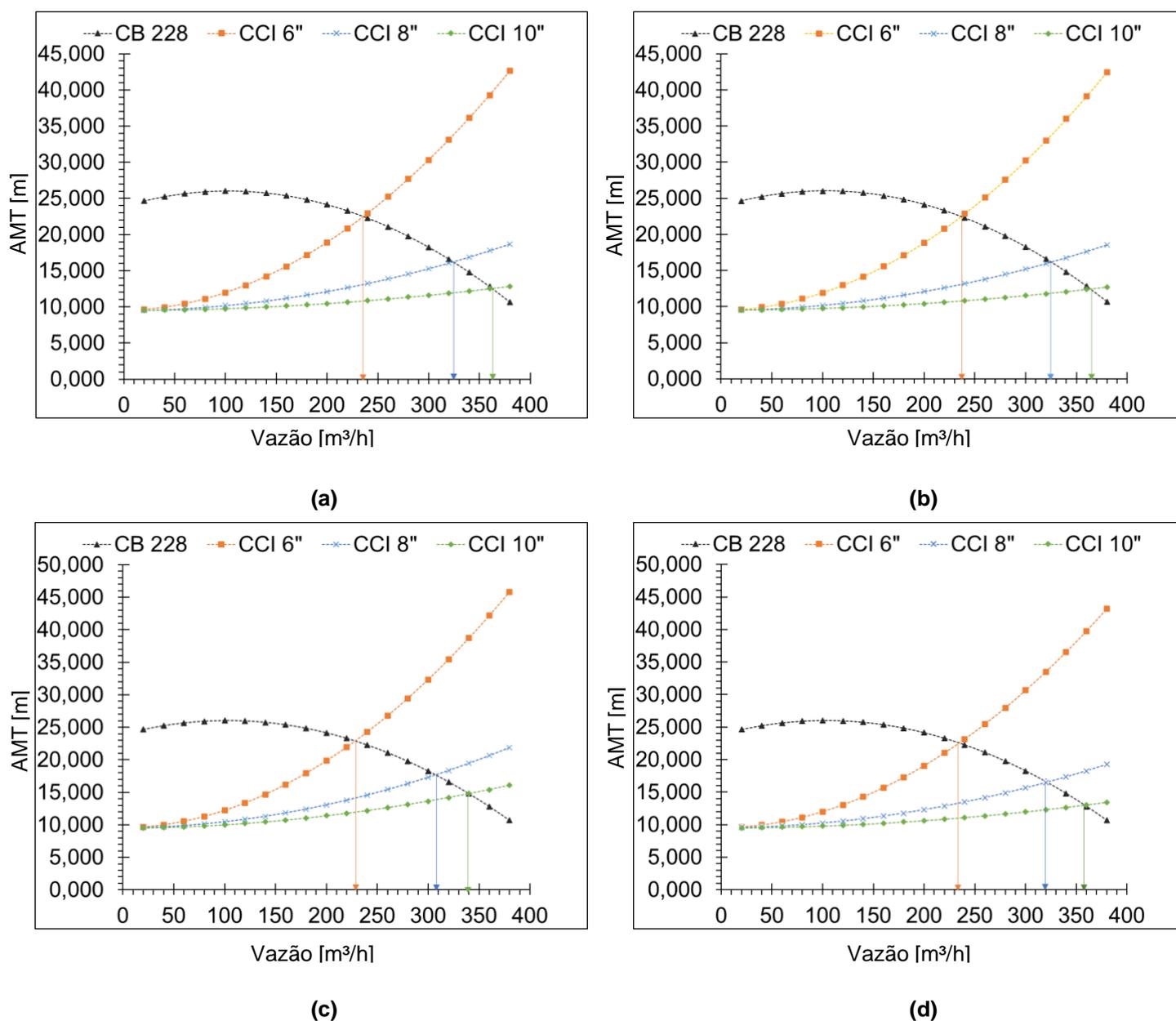


Fonte: Dos autores, 2024.

Feito isso, uma vez que o coeficiente de determinação resultante foi bem próximo de 1, foi possível prosseguir, sem a necessidade de se utilizar métodos numéricos, com os procedimentos de cálculo, conforme descritos para o recalque para cada um dos diâmetros de sucção fixados.

Como resultado, obteve-se, então, um ponto de trabalho diferente para os diâmetros de recalque escolhidos, sendo eles 6", 8" e 10" conforme as respectivas CCI, curvas características de instalação, retratados na **Figura 6**.

Figura 6. Pontos de trabalho obtidos fixando uma sucção de 4" (a), 6" (b), 8" (c) e 10" (d).



Fonte: Dos autores, 2024.

Pela análise da **Figura 6(a)**, as vazões de operação no recalque determinadas para 6", 8" e 10" foram, respectivamente equivalentes a valores próximos de 230 m³/h, 310 m³/h e 340 m³/h.

Pela análise da **Figura 6(b)**, as vazões de operação no recalque determinadas para 6", 8" e 10" foram, respectivamente equivalentes a valores próximos de 231 m³/h, 320 m³/h e 359 m³/h.

Por fim, pelas análises da **Figura 6(c)** e **Figura 6(d)** foi possível notar que as vazões de operação no recalque determinadas para 6", 8" e 10" assumiram valores muito próximos daqueles descritos para a **Figura 6(b)**, fluando cerca de 3 m³/h a 5 m³/h mais de uma para outra.

Em termos práticos de projeto, como recomendação dos engenheiros mais experientes da Usina, deve ser contabilizado um erro nessa vazão de aproximadamente 30 a 50 m³/h tanto para mais quanto para menos, então, pensando no geral, praticamente todos os 12 pontos de trabalho obtidos satisfazem aquela vazão desejada pelo cliente de 200 m³/h, ignorando o que já foi pontuado para os diâmetros de sucção.

Sendo assim, a fim de se obter o diâmetro ótimo para o presente dimensionamento, recorreu-se ao conceito de diâmetro econômico para tomar a decisão final.

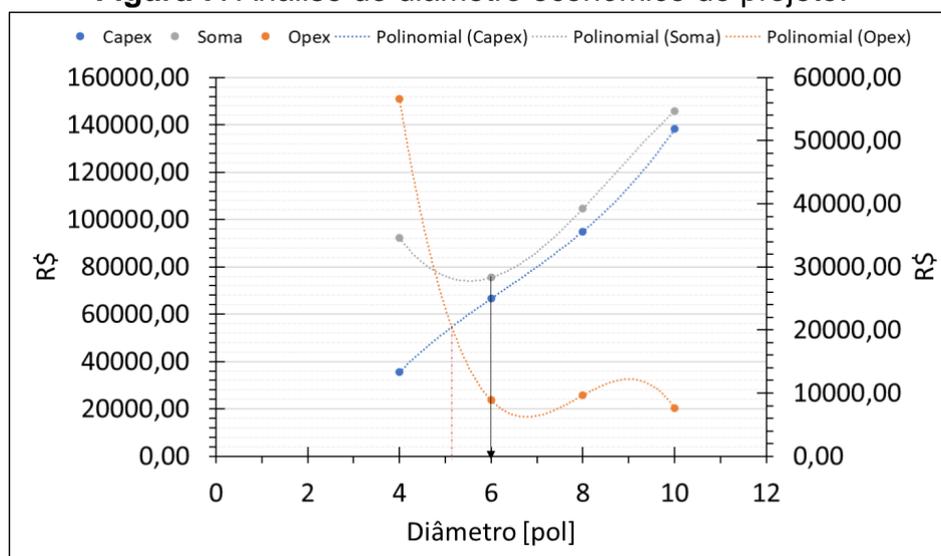
Diâmetro econômico

Para o cálculo do diâmetro ótimo, fez-se necessário o apuramento do *capex*, *opex* e da soma de ambos para a construção do gráfico de análise de acordo com a metodologia escolhida.

Para tal apuramento, consultou-se os valores cadastrados no sistema de fornecedores da Usina, os quais também não serão divulgados no presente trabalho por motivos de sigilo industrial, de tubulação, acessórios e válvulas levantados no dimensionamento, todos segundo as normas por eles pré estabelecidas tanto para o material e a espessura definidos, além da média gasta com mão de obra e energia em projetos similares a este.

Ao final, todos os resultados foram compilados na forma gráfica conforme demonstra a **Figura 7**.

Figura 7. Análise do diâmetro econômico de projeto.



Fonte: Dos autores, 2024.

Pela análise da **Figura 7**, após a aplicação do método descrito para a obtenção do diâmetro econômico, como resultado, o ponto mais baixo da linha da soma, ou seja, o valor mais econômico para o projeto retornou o diâmetro de recalque equivalente a 6".

Dessa forma, unindo, enfim, a análise realizada para sucção, recalque e análise do diâmetro econômico, optou-se pelo valor de 8" para a sucção em razão do seu menor custo para o projeto, uma vez que tanto 8" quanto 10" satisfizeram a condição imposta para o NPSH a fim de se evitar a cavitação.

Já para o recalque, definiu-se 6" como o diâmetro ótimo de projeto, com um ponto de trabalho equivalente a cerca de 235 m³/h, satisfazendo a imposição de 200 m³/h e ainda retornando uma economia comprovada após a análise do diâmetro econômico.

Além disso, apesar de na prática apresentar controvérsia quanto a esse conceito, como boa prática de projeto, alcançou-se uma velocidade de projeto maior para a descarga em relação a sucção, usualmente recomendado quando possível de se alcançar em razão da diminuição da cinética na entrada da bomba, em outras palavras a diminuição da perda de carga na sucção.

Verificação da potência

Definidos os valores dos diâmetros de tubulação para a sucção e o recalque, bastou-se conferir a limitação de potência consumida ao projeto equivalente a 25 CV.

Para tal, recorreu-se novamente ao catálogo eletrônico para obtenção do rendimento da bomba para os valores de vazão e altura manométrica total encontrados, obtendo-se um valor próximo de 80%, possibilitando, enfim a aplicação da **Equação 12**.

Como resultado, atingiu-se cerca de 17 CV de potência para o dimensionamento realizado, um valor com uma folga de aproximadamente 23%, valor este considerado aceitável, sem contar que na própria fabricação do motor, a potência estabelecida é cerca de 1,5 vezes maior ao valor nominal (25 CV) como norma de segurança do fabricante.

Dimensionamento utilizando o software livre Scilab

No intuito de otimizar o processo implementado no Excel, simulou-se, primeiramente, o procedimento metodológico da sucção encontrando-se os valores para NPSH e a vazão correspondente para cada diâmetro de sucção, respeitando o critério de não cavitação.

O mesmo procedimento matemático foi aplicado para os cálculos do recalque, encontrando-se assim, os respectivos pontos de operação para cada um dos diâmetros. dados obtidos estão dispostos nas **Tabelas 4 a 7**.

Tabela 4. Valores obtidos para NSPH requerido e disponível em relação a vazão.

Tubo	Vazão [m ³ /h]	NPSHr	NPSHd
4	100	3,06	3,41
6	180	3,78	4,06
8	200	4,15	4,46
10	200	4,15	4,60

Tabela 5. Pontos de trabalho determinados fixando o diâmetro da sucção em 6".

Tubo	Vazão [m ³ /h]	Ham_f	Hman
6	240	20,23	18,51
8	240	20,23	18,51
10	360	8,39	7,90

Tabela 6. Pontos de trabalho determinados fixando o diâmetro da sucção em 8”.

Tubo	Vazão [m ³ /h]	Ham_f	Hman
6	220	21,57	19,38
8	300	15,13	13,75
10	340	10,82	10,61

Tabela 7. Pontos de trabalho determinados fixando o diâmetro da sucção em 10”.

Tubo	Vazão [m ³ /h]	Ham_f	Hman
6	220	21,57	20,21
8	300	15,13	14,58
10	320	13,06	11,16

Fonte: Dos autores, 2024.

Pela análise das **Tabelas 4 a 7**, observa-se a escolha mais viável para o diâmetro da tubulação da sucção e do recalque foram, de fato, conforme observado via Excel, 8” e 6”, respectivamente.

Portanto, é possível afirmar que os resultados obtidos no dimensionamento utilizando o Scilab foram condizentes com os dados encontrados utilizando o *software* Excel, porém, as respostas na sua forma numérica foram muito mais práticas e eficazes, uma vez que a dependência de uma análise gráfica foi retirada, e, principalmente, por aplicar uma ferramenta gratuita e acessível a todos.

CONCLUSÃO

Foi possível dimensionar um sistema de bombeamento de água de um córrego do Rio Sapucaí até o tanque de abastecimento do sistema de irrigação por gotejamento, de uma usina sucroalcooleira, respeitando a vazão de interesse de 200 m³/h e o uma potência de consumida de 25 CV.

Diante dos resultados obtidos, para evitar a ocorrência de vaporização de líquido na tubulação, em outras palavras, a não cavitação, definiu-se que o diâmetro da sucção deve ser igual 8”, uma vez que, com a vazão de 200 m³/s fornece um NPSH disponível maior que o NPSH requerido, prevenindo, assim, gargalos no futuro.

Em relação ao recalque, determinou-se que o diâmetro ideal para atender a vazão desejada é igual a 6”, respeitando o ponto de operação e a análise econômica.

Visando a praticidade do processo de dimensionamento, a utilização do Scilab foi essencial para a comparação dos resultados obtidos no Excel, facilitando o estudo e a escolha da tubulação a ser utilizada no projeto de bombeamento, uma vez que os resultados retornados na forma direta, por meio de matrizes, são muito mais ágil e visual em comparação com a metodologia de análise gráfica.

Vale ressaltar que o presente trabalho teve grande importância para aplicação de conhecimentos referentes a bombas centrífugas e sistemas adutores para irrigação, como também, agregou de forma exponencial os conhecimentos reais sobre estratégias econômicas em projeto industriais.

Por fim, sugere-se como objeto de estudo para futuros trabalhos, o incremento de vazão, excluindo a substituição da bomba atual como alternativa.

Para isso, recomenda-se como ponto de partida a associação do mesmo modelo da bomba atual em paralelo, conforme já mencionado nos resultados, além da possibilidade

de instalação de um inversor de frequência ou uma válvula de controle, bem como o comparativo entre ambos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. P. R. S.; ARAÚJO, C. A. O. Análise de um sistema de elevação de fluido sem o auxílio de uma fonte motora. **Revista Vozes dos Vales**, v. 8, n. 16, 2019.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

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

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

CARR, M. K. V.; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 1-25, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479710000645>.

COELHO, W. R. **Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga**. 2006. 234 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2006.

COMO a irrigação por gotejamento torna o cultivo de cana-de-açúcar mais eficiente. **Jornal Cana**, 18 jun. 2021. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/mercado/como-a-irrigacao-por-gotejamento-torna-o-cultivo-de-cana-de-acucar-mais-eficiente/>. Acesso em: 15 mar. 2023.

CORRÊA, F. **Fenômenos de Transporte: Diâmetro Econômico**. Notas de Aula. PUC Goiás. 2016. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17297/material/4%20diametro%20economico.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2023.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n1p1-11>.

DENÍCULI, W. **Bombas Hidráulicas**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV. 2005.

DENN, M.M. **Process fluid mechanics**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1980

ESTEVES, B. S.; SILVA, D. G.; PAES, H. M. F.; SOUSA, E. F. **Irrigação por gotejamento**. Niterói: Programa Rio Rural, 2012.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.

FREITAS FILHO, P.J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicações em Arena**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GAIO, M. M.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás. 2005.

GALVANI, E. **Pressão Atmosférica**. Notas de Aula. Universidade de São Paulo. 2018.

Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4299940/mod_resource/content/1/Pressao%20atmosf%C3%A9rica.pdf#:~:text=A%20figura%20a%20seguir%20mostra,atmosfera%20padr%C3%A3o%20com%20a%20altitude.&text=Patm%20%3D%201013%2C%203%20mb%20%E2%96%AA,%2C75%20e%20vice-

[versa.&text=na%20press%C3%A3o%20da%20superf%C3%ADcie%20de,principalmente%20a%20diferen%C3%A7as%20de%20altitudes.&text=n%C3%ADvel%20do%20mar.](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4299940/mod_resource/content/1/Pressao%20atmosf%C3%A9rica.pdf#:~:text=A%20figura%20a%20seguir%20mostra,atmosfera%20padr%C3%A3o%20com%20a%20altitude.&text=Patm%20%3D%201013%2C%203%20mb%20%E2%96%AA,%2C75%20e%20vice-versa.&text=na%20press%C3%A3o%20da%20superf%C3%ADcie%20de,principalmente%20a%20diferen%C3%A7as%20de%20altitudes.&text=n%C3%ADvel%20do%20mar.)

Acesso em: 16 mar. 2023.

GAMA, C. H. A.; SOUZA, V. C. B.; CALLADO, N. H. Analysis of methodologies for determination of the economic pipe diameter. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, e35, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180148>.

GOMES, O. M. **Análise da Eficiência Energética de Uma Bomba Centrífuga de Bancada**. 2017. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

HOUGHTALEN, R. J.; HWANG, N. H. C.; AKAN, A. O. **Engenharia Hidráulica**. 4. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2012.

LAMM, F. R.; BORDOVSKY, J. P.; SCHWANKL, L. J.; GRABOW, G. L.; ENCISO-MEDINA, J.; PETERS, R. T. *et al.* Subsurface drip irrigation: status of the technology in 2010. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 2, p. 483-491, 2012. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.41387>.

LENGSFELD, F. L.; DUARTE, R.; ALTIERI, C.; SILVA, M. A. **Manual de Treinamento: seleção e aplicação de bombas centrífugas**. 5. ed. São Paulo: Ksb Bombas Hidráulicas, 2005.

MACINTYRE, A. J. **Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986.

OLIVEIRA, F. S. **Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Associação de Bombas**. 2017. 42 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.

SANTOS, A. M. Bomba Centrífuga: O que é? Quais os tipos? Como funciona? E principais dicas! **Blog Mérito Comercial**. 22 jan. 2024. Disponível em: <https://blog.meritocomercial.com.br/bomba-centrifuga/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

SCHMIDT FILHO, E.; GONÇALVES, J. C.; MATOS, N. C. S.; AZEVEDO, R. E. C. Redução dos Impactos Ambientais do Setor Sucroalcooleiro com a Utilização da Torta de Filtro na Adubação do Solo. **Revista Uningá Review**, v. 27, n.3, p. 05-09, 2016.

SERGHIDES, T. K. Estimate friction factor accurately. **Chemical Engineering**, v. 91, p. 63–64, 1984.

SILVA, E. M.; CUNHA, J. P. V. S. Scilab, Scicos e Rltool: *Softwares Livres no Ensino de Engenharia Elétrica*. In: **XVI Congresso Brasileiro de Automática**. Salvador, Bahia, 2006.

SIMÕES, M. A. **Operações Unitárias**. Cavitação e NPSH: seleção da bomba para uma instalação. Notas de aula. 2020. Disponível em: http://masimoes.pro.br/op_uni/4_nps/cav_nps_slides.pdf. Acesso em: 09 jan. 2023.

TAKAMI, R. **Apostila de bombas**. 2011. Disponível em: http://www.dequi.eel.usp.br/~tagliaferro/Apostila_de_Bombas.pdf. Acesso em: 04 abr 2023.

VEDATECH. American National Standards Institute. **Tubos de aço**: dimensões normalizadas. Tubos de Acordo com as Normas ANSI B.36.10 e B.36.19. 2012. Disponível em: http://vedatech.com.br/global/tabelas/TUBOS_DE_ACO_DIMENSOES_NORMALIZADAS.pdf. Acesso em: 05 mar. 2023.

YOGITHA B.; KARTHIKEYAN, M.; MUNI REDDY, M. G. Progress of sugarcane bagasse ash applications in production of Eco-Friendly concrete – Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.814>.

VITAL, A. Brasil voltará a ser o maior produtor de açúcar em 2023/24, diz Czarnikow. **UDOP - União Nacional da Bioenergia**. 31 jan. 2023. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2023/01/31/brasil-voltara-a-ser-o-maior-produtor-de-acucar-em-2023-24-diz-czarnikow.html>. Acesso em: 15 mar. 2023.

Recebido em: 23/06/2023

Aprovado em: 15/08/2024