

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

AMANDA GABRIELA SOBRAL LOPES

**USO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL EXCEL/VBA NO  
DIMENSIONAMENTO DE BOMBAS CENTRIFUGAS PARA  
SISTEMAS DE TUBULAÇÕES**

Campina Grande

2021

AMANDA GABRIELA SOBRAL LOPES

**USO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL EXCEL/VBA NO  
DIMENSIONAMENTO DE BOMBAS CENTRIFUGAS PARA  
SISTEMAS DE TUBULAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto.

Campina Grande

2021



AMANDA GABRIELA SOBRAL LOPES

**USO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL EXCEL/VBA NO DIMENSIONAMENTO  
DE BOMBAS CENTRIFUGAS PARA SISTEMAS DE TUBULAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e julgado apto em:

21/05/2021

Banca examinadora:

---

Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto (UAEQ/CCT/UFCG)

Orientador

---

Ana Regina Nascimento Campos (UAEQ/CCT/UFCG)

Examinador

---

Laércio Gomes de Oliveira (UAEQ/CCT/UFCG)

Examinador

*"But if you never try, you'll never know just what you're worth."*

*Coldplay*

## AGRADECIMENTOS

Nossa trajetória de vida é composta de diversas fases, inúmeros momentos e, através deles, possuímos a magnífica dádiva de conviver com pessoas. Hoje, agradeço em primeiro lugar a Deus por permitir minha evolução pessoal e profissional durante esses 5 anos, agradeço por Ele ter colocado em minha trajetória, pessoas maravilhosas que não apenas me estenderam a mão em momentos difíceis, mas em alguns deles me carregaram no colo, transmitindo forças e energia para seguir.

À minha família, minha eterna gratidão pela base forte que me impulsiona a desejar sempre ser melhor, buscar minha melhor versão em todas as esferas da minha existência. Ao meu pai, obrigada por ser exemplo de persistência, resiliência e dedicação. À minha mãe, obrigada por me ensinar a ser mulher forte, lutar pelos meus objetivos e me fazer acreditar que eu sou capaz de alcançar tudo o que eu quiser.

Aos meus colegas de curso, gratidão por me ajudarem a enxergar que nós podemos sempre mais do que imaginamos e que é possível trilhar esse caminho sem desprezar a ética profissional, a moral e os bons costumes.

Às minhas amigas Cindy e Jéssica, vocês me ensinaram a mansidão, a humildade e o companheirismo. As RBN'S, Bruna, Helen, Ana Clara, Ana Fernanda, Maria Clara, Maria Eduarda, Naara e, aos meus amigos, Paulo, Lopes e Ítalo, saibam que a amizade de vocês foi o meu pilar, em algum momento desses 5 anos ou até mesmo durante todo ele.

Aos meus professores e mestres, especialmente ao meu orientador Prof. Severino e ao meu coordenador Prof. Laércio, obrigada pelo conhecimento compartilhado, pelo amor doado em sala, por ensinar que a Engenharia Química é mais complexa, ampla, acolhedora e mais apaixonante do que se vê. Minha imensa gratidão aos que me aconselharam, impulsionaram me inspiraram e não me deixaram desistir.

Por fim, a Julian Muñoz e sua amada Sandra, pessoas que me apresentaram a Engenharia Química com um amor elementar e um sorriso no rosto, em uma tarde de domingo. Espero poder irradiar vossa leveza no sorriso e o amor da profissão no coração, fazendo deste mundo um lugar melhor.

LOPES, A.G.S. **Uso de aplicativo computacional Excel/VBA no dimensionamento de bombas centrífugas para sistemas de tubulações.** 2021. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2021.

## RESUMO

O dimensionamento de um sistema de bombeamento carrega um dos problemas mais frequentes na hidráulica, pois ao dimensionar os diâmetros das tubulações em instalações de recalque depara-se com um problema hidraulicamente indeterminado, pois diâmetros maiores resultam em alto custo, velocidades baixas e menor perda de carga e diâmetros menores resultam em menor custo, maior velocidade e maiores perdas de carga. Por existir esse impasse, utilizou-se do software de planilhas que cresceu e lidera esse mercado desde os anos 2000, o Excel, facilitando o estudo da influência dos parâmetros e tornando mais prático a escolha da bomba e do dimensionamento de uma instalação elevatória. Apresentada a relevância no estudo dos sistemas de bombeamento e a praticidade da utilização de softwares, o presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo que conglomerasse informações sobre sistema de bombeamento por meio de estudo de casos e que possibilite a utilização e aplicação de uma plataforma computacional no Excel/VBA favorecendo assim, a escolha na utilização de uma bomba como também auxiliando a formação de novos engenheiros. O software utilizado foi desenvolvido e disponibilizado para uso, pelo Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, discente da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A plataforma possui uma base de cálculos para determinar o ponto de funcionamento, partindo da equação de Bernoulli e das equações de balanço. Foram realizadas simulações para análise do efeito de alguns parâmetros, como diâmetro das tubulações e NPSH, em instalações elevatórias. Os resultados das diferentes simulações avaliadas ratificam que o ponto de operação depende de vários parâmetros e que para não haver cavitação o valor do NPSH na região da tubulação de sucção deve ser sempre maior do que o disponibilizado pelo fabricante da bomba. Além disso, a potência requerida pelo sistema de tubulação da bomba centrífuga mostrou-se mais sensível a variação do diâmetro da tubulação de recalque.

**Palavras – chave:** Equação de Bernoulli; Regimes de escoamento; Ponto de funcionamento.

LOPES, A.G.S. **Use of Excel/VBA computer application for sizing centrifugal pumps for piping systems.** 2021. 54p. Course Conclusion Paper (Bachelor in Chemical Engineering). Federal University of Campina Grande. Campina Grande, PB. 2021.

### **ABSTRACT**

The sizing of a pumping system carries one of the most frequent problems in hydraulics, because when sizing the diameters of pipes in pumping installations, one is faced with a hydraulically indeterminate problem, since larger diameters result in high cost, low speed and lower pressure drop, and smaller diameters result in lower cost, higher speed and higher pressure drop. Because of this impasse, Excel, the spreadsheet software that has grown and led this market since the 2000s, was used, facilitating the study of the influence of the parameters and making the choice of the pump and the sizing of a pumping system more practical. After presenting the relevance of the study of pumping systems and the practicality of the use of software, the present work aimed to carry out a study that gathers information about pumping systems through case studies and that enables the use and application of a computational platform in Excel/VBA, thus favoring the choice in the use of a pump as well as helping in the education of new engineers. The software used was developed and made available for use by Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, a student at the Federal University of Campina Grande (UFCG). The platform has a base of calculations to determine the operating point, starting from Bernoulli's equation and the balance equations. Simulations were performed to analyze the effect of some parameters, such as pipe diameter and NPSH, in pumping installations. The results of the different simulations ratify that the operation point depends on several parameters and that in order to avoid cavitation the NPSH value in the region of the suction pipe should always be higher than that provided by the pump manufacturer. Furthermore, the power required by the piping system of the centrifugal pump proved to be more sensitive to the variation of the diameter of the discharge piping

**Key words:** Bernoulli's equation; flow regimes; operating point.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração dos fluxos laminar e turbulento .....	16
Figura 2 – Representação da velocidade no escoamento laminar.....	17
Figura 3 – Representação da velocidade no escoamento laminar.....	17
Figura 4 - Diagrama de Moody.....	21
Figura 5 - Determinação do ponto de trabalho de bombas hidráulicas .....	24
Figura 6 - Ponto de melhor eficiência.....	26
Figura 7 – Instalação de um sistema elevatório .....	28
Figura 8 - Tela inicial do programa.....	29
Figura 9 - Tela de inserção das configurações das tubulações e do fluido .....	30
Figura 10 – Tela para escolha da bomba e apresentação de resultados.....	31
Figura 11 – Base de dados de catálogos das bombas.....	31
Figura 12 – Tela para seleção dos acessórios que compõem o sistema .....	32
Figura 13 – Saída de dados gráfica e cálculo do ponto de operação.....	32
Figura 14 – Acessórios que compõe o sistema.....	34
Figura 15 - Ponto de operação do sistema – bomba centrífuga.....	35
Figura 16 – Variáveis de interesse determinadas no ponto de operação.....	35
Figura 17 – Pressão de sucção em função da vazão.....	36
Figura 18 - NPSH do sistema em função da vazão de alimentação .....	37
Figura 19 - Ponto de operação em função do diâmetro de sucção .....	38
Figura 20 - Ponto de operação em função do diâmetro de recalque.....	39
Figura 21 - Gráfico da potência em função do diâmetro de sucção .....	41
Figura 22 - Gráfico da potência em função do diâmetro de recalque.....	42
Figura 23 - NPSH em função da variação do diâmetro de sucção.....	44
Figura 24 - Gráfico do NPSH em função da variação do diâmetro de recalque .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de perda localizada em componentes .....	22
Tabela 2 - Dados referentes as tubulações de sucção e recalque.....	33
Tabela 3 - Parâmetros de propriedades do fluido .....	33
Tabela 4 - Simulação para avaliar o efeito do diâmetro de sucção .....	37
Tabela 5 - Simulação para avaliar o efeito do diâmetro de recalque.....	39
Tabela 6 - Resultados da potência de operação com a variação do diâmetro de sucção .....	41
Tabela 7 - Resultados da potência de operação com a variação do diâmetro de recalque .....	42
Tabela 8 - NPSH em função da variação do diâmetro de sucção .....	43
Tabela 9 - Resultados do NPSH em função da variação do diâmetro de recalque...	44

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.1.1 Geral .....	13
1.1.2 Específicos .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 TRANSPORTE DE FLUIDOS.....	14
2.2 REGIMES DE ESCOAMENTO.....	16
2.3 PERDAS DE CARGA .....	19
2.3.1 Perda de carga distribuída .....	19
2.3.2 Cálculo de perda de carga localizada .....	21
2.4 SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....	23
2.4.1 Bombas centrífugas.....	23
2.5 PONTO DE FUNCIONAMENTO DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	24
2.6 PLANILHAS ELETRÔNICAS .....	26
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
3.1 DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO DA PLATAFORMA .....	28
3.2 CASO DE ESTUDO .....	33
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
4.1 ESTUDO DE CASO.....	35
4.2 ANÁLISE DE VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO .....	36
4.3 INFLUÊNCIA DOS DIÂMETROS DE SUCÇÃO E DE RECALQUE SOBRE O PONTO DE OPERAÇÃO .....	37
4.5 EFEITOS DOS DIÂMETROS DE SUCÇÃO E RECALQUE SOBRE O NPSH .....	43
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>47</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE I – GRÁFICOS COM OS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO VARIANDO O DIÂMETRO DE SUCÇÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE II – GRÁFICOS COM OS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO VARIANDO O DIÂMETRO DE RECALQUE .....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em geral, um sistema de bombeamento carrega um dos problemas mais frequentes da hidráulica. Dimensionar os diâmetros das tubulações em instalações de recalque representa um problema hidráulicamente indeterminado, pois diâmetros grandes resultam em alto custo agregado, velocidades baixas e menor perda de carga. E, diâmetros menores resultam em menor custo, maior velocidade e maiores perdas de carga.

Portanto, ao projetar o sistema de bombeamento, é necessário ter uma visão ampla de todas as conjunturas, analisando se: é economicamente viável, acessórios ideais para o projeto, diâmetros através de cálculos iterativos e configuração da instalação, para que não haja cavitação, é necessário que se tenha maneiras de simular, dimensionar, projetar além de, realizar o estudo de caso para avaliar as melhores escolhas e opções antes da execução prática.

O avanço da informação e a velocidade acelerada nas comunicações, todas as ferramentas que enriquecem e agregam facilitando os estudos ou, até mesmo, prevendo possíveis problemas são bem vindas. Por isso, a união de metodologias teóricas com a modelagem, atualmente, é essencial, tornando cada vez mais frequente o uso de simuladores de processo, tanto em indústrias quanto na academia. Logo, desenvolver uma ferramenta que seja acessível a todos os níveis de conhecimento é objetivo de estudo de vários trabalhos acadêmicos.

Com a modelagem correta das equações de balanço de conservação e energia mecânica, com a facilidade de utilização do software na escolha das bombas e a segurança na simulação do sistema de bombeamento, onde podem ser considerados os acessórios e seus efeitos causados, as questões físicas e mecânicas inerentes ao sistema, é favorável tanto para engenheiros que estão em momentos de tomadas de decisão, quanto para engenheiros em formação, facilitando o estudo de casos, prevenindo e apresentando possíveis problemas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Realizar um estudo que conglomere informações sobre sistema de bombeamento por meio de estudo de casos e que possibilite a utilização e aplicação de uma plataforma computacional no Excel/VBA favorecendo assim, a escolha na utilização de uma bomba como também auxiliando a formação de novos engenheiros.

### 1.1.2 Específicos

- Desenvolver e/ou aplicar um programa computacional em Excel/VBA para efetuar diferentes situações de casos.
- Avaliar os efeitos de parâmetros operacionais como diâmetro da tubulação de sucção e de recalque, acessórios, rugosidade e fluido utilizado sobre o comportamento da curva característica do sistema de tubulação, sobre o ponto de funcionamento e sobre o cálculo do NPSH (altura líquida positiva de sucção).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A engenharia química pode ser denominada como a engenharia universal, por conglomerar os conceitos de química, física, matemática e computação. Com esses conceitos básicos unidos ao conhecimento de engenharia, esses profissionais detêm as informações necessárias para projetar, construir e operar plantas industriais.

De acordo com FOUST *et al.*, (1982) a engenharia química é definida como a aplicação dos princípios das ciências físicas, econômicas e das relações humanas, aos processos e equipamentos em que se utilizam das substâncias para provocar modificações de estado, de energia ou de composição. Esse conceito, pode ser considerado amplo e vago, entretanto, deixa explícito que o profissional consegue adentrar todas as áreas que envolve processo, não importando o produto final da linha produtiva. Independe se a indústria é alimentícia, cosmética, química ou petroquímica, ou se ela está destinada a produzir matérias-primas ou produtos que são vendidos diretamente ao consumidor final.

Os processos químicos são constituídos por etapas diferentes, com o objetivo de transformar a matéria. Na prática, para deter esse conhecimento diverso, a base do profissional é moldada nas operações unitárias. São exemplos dessas operações, o transporte de fluidos, a transferência de calor, a destilação e absorção de gases, dentre outros. Neste trabalho, iremos focar no estudo do transporte de fluidos e no dimensionamento dos equipamentos que realizam esse transporte.

### 2.1 TRANSPORTE DE FLUIDOS

Para entendimento e estudo dos fluidos, partimos da Física básica estudando os conceitos da matéria e envolvendo os três estados físicos (sólido, líquido e gasoso). Adentrando nesse ramo, existe a área da mecânica dos fluidos concentrada no estudo dos líquidos e gases. E, aprofundando um pouco mais, têm-se a hidráulica que estuda apenas os líquidos, com especificidade na água (BAPTISTA; COELHO, 2012).

De acordo com Baptista e Coelho (2012), fluidos são substâncias no estado líquido ou gasoso que se deformam continuamente sob a ação de alguma força cisalhante. Algumas propriedades importantes para o estudo dos fluidos são: densidade absoluta; massa; volume; densidade relativa; pressão de vapor; viscosidade, dentre outros.

Nas grandes indústrias, o transporte de fluidos é uma operação básica e comumente utilizada. Na maioria das ocasiões, para que o material escoe ao longo do duto, é necessário a ação de uma força impulsora tendo em vista que, dependendo das configurações da instalação, não se pode levar em consideração apenas a ação da gravidade (FONSECA, 2019).

Os motores responsáveis pelo transporte de fluidos incompressíveis, são as bombas. O dimensionamento adequado desses equipamentos tem enfoque em um motor que opera com máxima eficiência e custo mínimo. A configuração do sistema de bombeamento, se divide em duas regiões que são analisadas separadamente, denominadas de região de sucção e região de recalque.

De acordo com Fonseca (2019), define-se como região de sucção o trecho que compreende a tubulação e seus acessórios entre o tanque de onde se quer bombear o fluido até a entrada da bomba. E como região de recalque, trecho que compreende a tubulação e seus acessórios entre a saída da bomba e o tanque para onde se quer bombear o fluido.

### ***Equação de Bernoulli***

Em um sistema de bombeamento, é comum que ocorram variações de energia ao longo da tubulação, além de que as configurações para as regiões de sucção e recalque são diferentes.

Portanto, o teorema de Bernoulli relaciona as variações de pressão com a velocidade, considerando a elevação ao longo da tubulação para uma análise de conservação de energia. Neste estudo, iremos considerar o regime permanente, sem troca de trabalho, sem atrito e o fluido como sendo incompressível, para essa condição têm-se a correlação matemática das energias de pressão, cinética e potencial do fluido, apresentada pela Equação 1 (GOMES, 2013).

$$\widehat{W} + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_f \quad (1)$$

Onde:

P é a pressão em um ponto do fluido;  $\rho$  é a massa específica do fluido; V é a velocidade média do escoamento; g é a aceleração da gravidade; Z é a altura estática do fluido,  $H_f = H_{fR} + H_{fS}$ .

## 2.2 REGIMES DE ESCOAMENTO

O parâmetro que classifica os regimes de escoamento é o número de Reynolds, Equação 2, este é um número adimensional definido como a relação entre força de inércia e a força referente a viscosidade do fluido (GOMES, 2013).

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (2)$$

A velocidade pode ser calculada através da Equação 3:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica da substância (kg/m<sup>3</sup>);

$D$  é o diâmetro da tubulação (m);

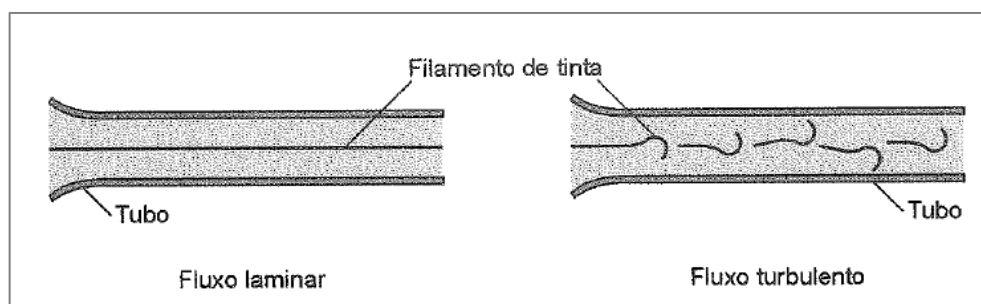
$\mu$  é a viscosidade do fluido (Pa.s);

$V$  é a velocidade do escoamento (m/s);

$Q$  é a vazão (m<sup>3</sup>/s);

É pela faixa do número de Reynolds que classificamos em escoamento laminar e turbulento, a Figura 1 demonstra o que ocorre dentro do tubo em cada situação.

Figura 1 - Demonstração dos fluxos laminar e turbulento



Fonte: Baptista; Coelho, 2012.

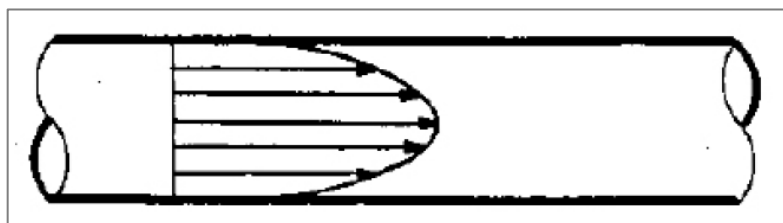
### **Escoamento laminar**

Para que o escoamento se configure laminar, é necessário que o  $Re < 2000$ . Neste escoamento, a velocidade máxima das partículas pode ser verificada no centro da tubulação e junto as paredes esta velocidade é nula. A Figura 2 representa o comportamento vetorial das partículas em uma seção do escoamento, estas formam



uma superfície parabólica com as linhas paralelas as paredes do tubo (GOMES, 2013).

Figura 2 – Representação da velocidade no escoamento laminar

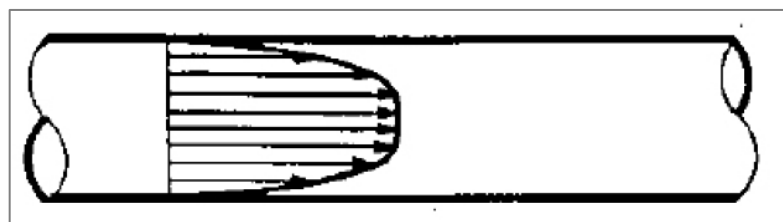


Fonte: Gomes, 2013.

### ***Escoamento turbulento***

Para esta configuração de escoamento, o parâmetro de Reynolds deve ser igual a  $Re > 4000$ . De acordo com a Figura 3 observa-se que há uma distribuição mais uniforme de velocidades, entretanto há irregularidade na orientação da velocidade das partículas.

Figura 3 – Representação da velocidade no escoamento laminar



Fonte: Gomes, 2013.

Quando o número de Reynolds se configura dentre a faixa crítica de 2000 e 4000, o regime pode ser laminar ou turbulento necessitando de uma análise mais profunda para essa determinação (FEGALHI, 2016).

### ***Equação da continuidade***

Esse conceito descende da lei de conservação da massa, onde é estabelecido que a massa não é criada ou destruída, ou seja, toda massa do ponto inicial de um sistema será igual a massa no ponto de saída. Ao aplicar o conceito nos pontos 1 e 2, temos a Equação 4 (BAPTISTA; COELHO, 2012).

$$\rho_1 A_1 U_1 = \rho_2 A_2 U_2 \quad (4)$$

Considerando que ao longo da tubulação o escoamento é com o mesmo fluido e não há entrada deste além do ponto 1, a massa específica pode ser considerada constante e o regime permanente. Logo, temos a simplificação da equação 4, na Equação 5 (BAPTISTA; COELHO, 2012).

$$A_1 U_1 = A_2 U_2 = Q \quad (5)$$

Onde:

A é a área da seção transversal do escoamento, em m<sup>2</sup>;

U é a velocidade média do escoamento, em m/s;

Q é a vazão, em m<sup>3</sup>/s.

### ***Equação da quantidade de movimento***

Esta equação é deduzida a partir da segunda Lei de Newton, aplicada ao conceito de quantidade de movimento ( $m\vec{v}$ ) e no cenário que estamos estudando, aplicamos os conceitos ao caso de escoamento de líquidos, obtendo a Equação 6 (BAPTISTA; COELHO, 2012).

$$\vec{R} = \rho Q (\beta_2 \vec{U}_2 - \beta_1 \vec{U}_1) \quad (6)$$

Nos escoamentos em regimes turbulentos o coeficiente de quantidade de movimento ( $\beta$ ) é superior a 1,1, para os escoamentos laminares este parâmetro é 1,33 e, para escoamentos livres, o coeficiente varia de 1,02 e 1,12. Entretanto, o parâmetro pode ser calculado pela Equação 7.

$$\beta = \frac{\int_A \vec{v}^2 dA}{U^2 A} \quad (7)$$

Onde:

$\vec{R}$  é a resultante das forças externas atuantes no sistema (N);

$\rho$  é a massa específica do líquido (kg/m<sup>3</sup>);

Q é a vazão (m<sup>3</sup>/s);

U é a velocidade média que representa o perfil do escoamento na seção analisada (m/s);

$\beta$  é o coeficiente da quantidade de movimento, ou de Boussinesq (adimensional).

Baptista e Coelho (2012) afirmam, que é importante destacar a diferença existe entre forças internas e externas. De acordo com a 1ª lei de Newton, a resultante das forças internas será nula, pois para cada ação existe uma reação. Todavia, como as forças externas agem sobre a superfície fechada, elas distinguem entre si devido a pressão e ao peso.

## 2.3 PERDAS DE CARGA

Perdas de carga em uma tubulação podem ser definidas como as perdas energéticas que o sistema provoca no escoamento. Logo, tais perdas são quantitativamente calculadas em função das propriedades viscosas do fluido, da geometria e das dimensões do meio em que o fluido escoar. No caso de um tubo, essas perdas são calculadas em função do seu diâmetro, comprimento, rugosidade e da sua geometria em caso de tubos não retilíneos (ÇENGEL, 2006).

### 2.3.1 Perda de carga distribuída

A perda de carga distribuída ocorre em função dos atritos por toda a extensão da tubulação, sendo representada pela fórmula universal, proposta por Chèzy (1775), Weisbach (1855) e Darcy (1857).

#### ***Fórmula universal***

A fórmula proposta para o cálculo da perda de carga é válida para qualquer líquido e também denominada de fórmula universal ou racional.

$$h_p = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

Na Equação 8, L é o comprimento do tubo (m), v a velocidade média do fluido (m/s), D o diâmetro da canalização (m), g a constante de aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>), h<sub>p</sub> a perda de carga distribuída (m) e f o fator de atrito ou fator de resistência, do qual, depende do regime de escoamento.

O fator de atrito que é utilizado para cálculo da perda de carga. Pode ser obtido por várias equações como as que foram deduzidas ao longo dos anos. Foram criadas equações para diferentes regimes, tendo em vista que elas diferem muito quando o escoamento é laminar, transitório ou turbulento. De acordo com Provenzano et al

(2004), em regimes laminares, o cálculo do fator de atrito pode ser feito com o uso da equação de Hagen- Poiseuille (Eq. 9) no qual, o fator de atrito (f) depende apenas de  $Re$ :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

No escoamento turbulento o fator de atrito depende, além de  $Re$ , da rugosidade relativa do tubo ( $\varepsilon/D$ )-  $\varepsilon$  é a altura média das rugosidades do tubo – o que pode dificultar razoavelmente sua determinação. Para estimar o valor do fator de atrito (f) existem muitas correlações, como, a *Equação de Colebrook*, *Equação de Churchill* e *Diagrama de Moody* (PROVENZANO, 2004).

### **Equação de Colebrook**

A correlação descrita por Colebrook (1939) tem sido considerada como a mais precisa que temos para estimar o fator de atrito (f) (Eq. 10), apesar de implícita em f. Sendo válida para tubos lisos e rugosos nos regimes de transição e turbulento plenamente desenvolvido e para valores de  $\frac{D}{\varepsilon} < 0,01$ . (FONSECA, 2019)

$$\frac{1}{f} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7065D} + \frac{2,5226}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

Onde  $\varepsilon$  = rugosidade equivalente;  $Re = \frac{DV\rho}{\mu}$  é o número adimensional de Reynolds; D = diâmetro interno do tubo (em metros); V = velocidade média do fluido (m/s);  $\rho$  = massa específica ou densidade absoluta ( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu$  = viscosidade dinâmica ou absoluta ( $\text{kgf.s/m}^2$ ).

### **Equação de Churchill**

É a correlação válida para qualquer  $Re$  e qualquer valor de rugosidade específica ( $\varepsilon/D$ ). Fonseca (2019) afirma que a correlação explícita em f (Eq. 11) é a mais recomendada.

$$f = 2 \left[ \frac{8}{Re} + \frac{1}{(A+B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (11)$$

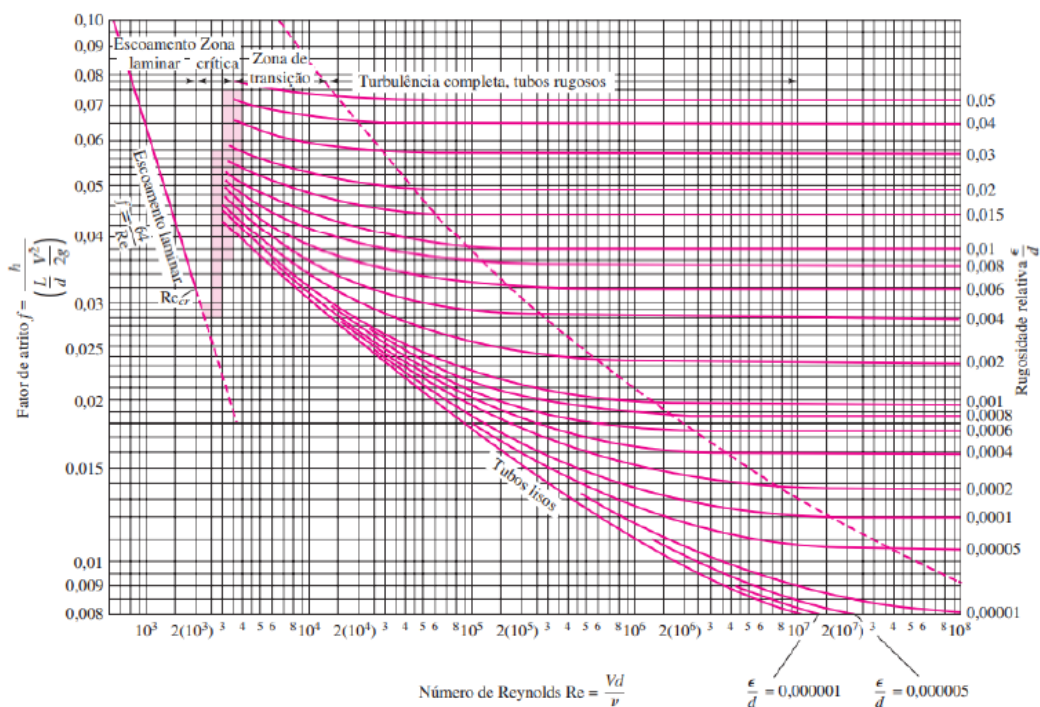
Onde,

$$A = \left[ 2,457 * \ln \left( \frac{1}{\frac{7}{Re}^{0,9} + 0,27 * \frac{\epsilon}{D}} \right) \right]^{16} \quad e \quad B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (12)$$

### Diagrama de Moody

As expressões para determinação do fator de atrito podem ser representadas através de diagramas característicos, como o de Moody-Rouse, Figura 4, que correlaciona o número de Reynolds com a rugosidade relativa para obter o fator de atrito. O diagrama de Moody possui uma precisão de  $\pm 15\%$  (WHITE, 2010).

Figura 4 - Diagrama de Moody



Fonte: (White, 2010).

### 2.3.2 Cálculo de perda de carga localizada

A perda de carga localizada ocorre em trechos da tubulação onde há presença de acessórios, como curvas, conexões, alargamentos, reduções, válvulas, e ainda, equipamentos, como trocadores de calor. Sendo originada em consequência à turbulência, mudança de direção e alteração da velocidade. Assim, parte da energia mecânica disponível no fluido dissipa-se em forma de calor (FONSECA, 2019).

Em seu estudo Fonseca (2019), analisou que os principais métodos para estimar a perda de carga localizada são: **a)** utilizando-se a expressão geral **b)** através do método dos comprimentos equivalentes ou virtuais.

### **a) Cálculo da perda de carga localizada pela expressão geral**

A expressão geral para o cálculo dessa perda é da forma,

$$h_p = K \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Sendo  $h_p$  = perda de carga (metros de coluna de fluido – m.c.f.);  $K$  = coeficiente de perda de carga (adimensional);  $v$  = velocidade de referência (m/s);  $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Um sumário de perdas localizadas representativas de diversos componentes publicados por CRANE (1977) é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de perda localizada em componentes

<b>Componente</b>	<b>K</b>
<i>Válvula globo (tot. aberta)</i>	10
<i>Válvula em ângulo (tot. aberta)</i>	2,5
<i>Válvula de retenção – balanço (tot. aberta)</i>	2,5
<i>Válvula gaveta (tot. aberta)</i>	0,2
<i>Curva de retorno reduzida</i>	2,2
<i>Tê padrão</i>	1,8
<i>Joelho padrão</i>	0,9

Fonte: (Crane, 1977).

### **b) Cálculo da perda de carga localizada pelo método dos comprimentos equivalentes ou virtuais.**

Esse método tem o objetivo de facilitar o cálculo da perda localizada, considerando que as peças e conexões podem ser substituídas (no cálculo) por comprimentos virtuais de tubulação que resultem na mesma perda de carga. Ou seja, essa técnica consiste em transformar virtualmente um valor de perda de carga localizada em distribuída através do uso do comprimento equivalente, sem alterar o valor final da perda de carga total.

O comprimento equivalente pode ser obtido através das tabelas de comprimentos equivalentes fornecidas por fabricantes para um dado material do

acessório (PVC rígido, cobre, aço galvanizado, entre outros), e por fim, podem ser substituídos em qualquer umas das equações de perda de carga distribuída.

## 2.4 SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Para decidir qual o motor bomba utilizar, é necessário mapear o local da instalação da bomba, definir os trechos e acessórios que compõe as regiões de sucção e recalque do sistema, a pressão requerida, vazão volumétrica, propriedades do fluido que será transportado. Em seguida, realizar cálculo dos balanços e as perdas de carga e encontrar a altura manométrica.

Após o mapeamento na instalação do processo, o próximo passo é analisar qual bomba usar. A classificação mais utilizada, refere-se a como a bomba fornece energia ao fluido durante o escoamento, seguindo esse critério existem dois tipos de bombas: Bombas cinéticas ou dinâmicas (centrífugas) e bombas de deslocamento positivo ou volumétricas.

### 2.4.1 Bombas centrífugas

A ênfase desse trabalho é o estudo voltado a utilização das bombas centrífugas, tendo em vista que este é o equipamento mais utilizado para transportar líquidos no saneamento, na irrigação, nos edifícios residenciais e na indústria (BEZERRA *et al.*, 2010).

A energia cedida pela bomba ao líquido é denominada de altura manométrica ( $H_m$ ), esta é a diferença de pressão na sucção e no recalque da bomba, que determina a capacidade da bomba transportar o líquido. Quantitativamente, a altura manométrica é calculada através da Equação 14.

$$H_m = \pm H_{g_s} + H_{g_r} + H_{f_s} + H_{f_r} + \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

Onde:  $H_m$  é a altura manométrica (m);  $H_{g_s}$  é a altura geométrica de sucção (m) (para bombas não afogadas o termo é positivo e, para bombas afogadas o termo é negativo);  $H_{g_r}$  é a altura geometria de recalque (m);  $H_{f_s}$  e  $H_{f_r}$  são as perdas de carga na sucção e recalque (m), respectivamente;  $V$  é a velocidade na saída do recalque (m/s) e  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>) (GOUVEIA, 2012).

A escolha do motor adequado ao projeto da instalação elevatória, não se detém apenas a classificação pela energia fornecida ao fluido e, tão importante quanto a escolha do tipo de bomba, é análise do ponto de funcionamento do sistema através das curvas características. Macintyre (1987), relata que as informações fornecidas pelos fabricantes através das curvas, possui grande valia para o projetista determine a bomba apropriada para o sistema. Além de, ponderar o ponto de funcionamento e o modo de operação da instalação.

## 2.5 PONTO DE FUNCIONAMENTO DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

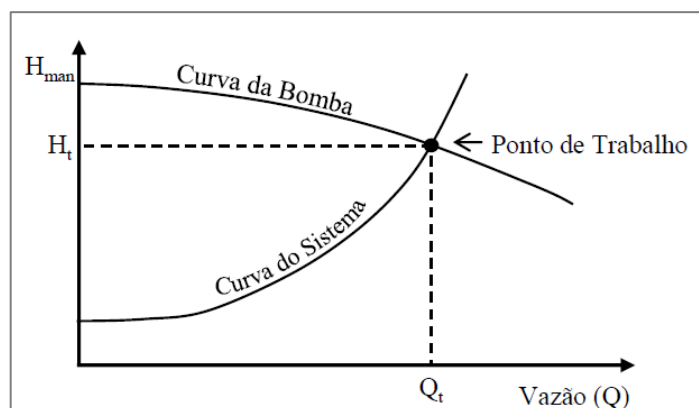
Portanto, após a escolha do motor bomba adequado ao sistema elevatório, é necessário analisar as curvas características da bomba e do sistema e, a partir do ponto de intercessão entre as curvas determina-se o ponto de funcionamento do sistema.

### ***Curvas características***

De acordo com Gouveia (2012), essas curvas características da bomba são representações gráficas das funções que relacionam os parâmetros do funcionamento da bomba, obtidas experimentalmente. Os dados gráficos, permitem relacionar vazão de recalque (Q) com a altura manométrica ( $H_m$ ), potência absorvida (P) e rendimento ( $\eta$ ) (MACINTYRE, 1987).

Gonçalves (2009) explica que o ponto de trabalho de um sistema de bombeamento é definido pelo ponto de intercessão das curvas características (Fig. 5) que explicitam a relação entre altura manométrica e vazão bombeada. Este ponto de intercessão caracteriza a condição de equilíbrio natural do conjunto sistema-bomba.

Figura 5 - Determinação do ponto de trabalho de bombas hidráulicas



Fonte: Gouveia, 2012.



Nos catálogos das bombas fornecidos pelos fabricantes, contém as informações de potência, altura manométrica e vazão, pois para cada modelo existem configurações que melhor se adequam a cada tipo de projeto. É necessário conhecer as configurações do seu projeto e pesquisar o motor mais adequado, aumentando a vida útil e diminuindo o período de manutenção na instalação elevatória.

### ***Cavitação***

Este fenômeno ocorre nas pás dos impelidores das bombas em caso de pressões reduzidas no líquido devido a uma combinação do escoamento e do movimento imposto pelas pás ao líquido. Quando a pressão absoluta atinge a pressão de vapor do líquido, este tende a vaporizar formando bolhas que também serão transportadas pelo movimento do líquido, até alcançar a região onde colapsam. Este fenômeno pode ser identificado por gerar ruídos a bomba, ocasionando desgaste no rotor e queda de rendimento (GOUVEIA, 2012).

O NPSH (altura líquida positiva de sucção) é um parâmetro capaz de prever a ocorrência da cavitação e quantificá-la. Para o NPSH da bomba, o fabricante deverá informar no catálogo do equipamento e o NPSH disponível no sistema poderá ser calculado através da equação 15 (FEGALHI, 2016).

$$NPSH_{disp} = H_s + \frac{P_{atm} - P_{vap}}{\gamma} \quad (15)$$

$$NPSH_{disp} > NPSH_{req}$$

Onde:  $NPSH_{disp}$  é o NPSH do sistema;  $H_s$  é a altura de sucção;  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica;  $P_{vap}$  é a pressão de vaporização do fluido e  $\gamma$  é o peso específico.

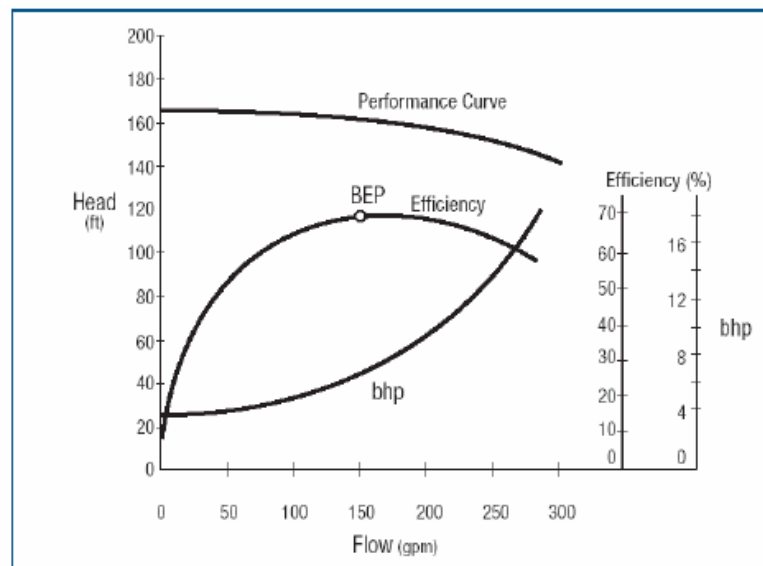
A equação 16, é a condição que garante a ausência do fenômeno cavitação, ou seja, para o sistema operar naturalmente é necessário que o NPSH disponível seja maior que o NPSH requerido pela bomba (FEGALHI, 2016).

### ***Eficiência da bomba***

O BEP (Best Efficiency Point) é determinado pela vazão na qual a bomba converte energia de entrada em energia hidráulica de saída de forma mais eficiente. Gouvea (2008) afirma que a maioria das bombas centrífugas de simples estágios tem o ponto de melhor eficiência localizado em torno de 70 a 85% da vazão máxima.

A Figura 6 apresenta uma curva característica de uma bomba específica incluindo o BEP, para este equipamento o ponto de melhor eficiência está a uma vazão de 150 gpm, contra a resistência de 160 pés, resultando em 70% de eficiência.

Figura 6 - Ponto de melhor eficiência



Fonte: Gouvea, 2008.

As curvas características das bombas, além de informar o ponto de trabalho são responsáveis por mostrar como obter maior eficiência. Para bombas centrífugas simples, as forças hidráulicas ao redor do rotor quando operam próximo a vazão do BEP, estão quase balanceadas resultando na maior eficiência, menor flexão radial do eixo e conseqüentemente menor vibração (GOUVEA, 2008).

## 2.6 PLANILHAS ELETRÔNICAS

Desde o início da história da humanidade, é possível afirmar que os seres humanos são adaptáveis. A cada nova dificuldade, nos empecilhos vivenciados, a humanidade busca das mais diversas formas a sobrevivência.

Com os sistemas da informação e da comunicação essa evolução ocorre seguindo a mesma regra: a busca de ferramentas que facilitem o dia-a-dia. Esse ambiente digital, proporciona a gestão e o armazenamento de dados e tem evoluído ao longo do tempo expandido o conhecimento, desde softwares abrangentes que permitem ser utilizados em variadas áreas até softwares específicos e com nichos direcionados.

De acordo com Oliveira (2019), a primeira planilha eletrônica surgiu a partir da observação do gasto de tempo para realização de cálculos em uma planilha escrita no quadro negro. Robert Frankston, foi um programador dos anos 70 que deu origem ao aplicativo simulador de um quadro negro e, logo após, unido a Dan Bricklin fundaram a empresa VISICORP, lançando seu primeiro produto: a planilha eletrônica Visacalc.

Chegando aos anos 80, a Lotus Corporation lançou o LOTUS 1 2 3, que gerava gráficos e possibilitava o usuário a organizar os dados como ferramentas para um banco de dados. Seguindo nessa evolução, nos anos 90 a Microsoft lançou seu produto, o Excel, iniciando no mercado como o líder e permanecendo como principal software para planilhas até os dias atuais (OLIVEIRA, 2019).

### ***O Excel***

Encontrar trabalhos e referências tendo o Excel como ferramenta de estudo, principalmente voltado para o ensino da matemática básica, é comum. Todavia, com a evolução da ciência de dados e o aprimoramento dos softwares, houve uma adesão por parte das empresas e companhias com a plataforma da Microsoft, tanto por ser prático e intuitivo, quanto pelo custo-benefício.

Por isso, atualmente, médias e grandes empresas exigem que seus colaboradores detenham conhecimento do Excel. Com isso, o crescimento no mercado de cursos e mini cursos focados na especialização dos profissionais das mais diversas áreas, tem crescido exponencialmente.

Por consequência desse mercado bem preparado e bastante concorrido, os alunos das graduações na área de exatas tem desenvolvido habilidades de programação e domínio das funções do Excel, o que gera um grande alcance para a plataforma, tornando-a essencial para alunos e profissionais nos dias atuais.

### 3. METODOLOGIA

Para a realização desse estudo, a metodologia proposta relacionou a modelagem matemática, advinda de conhecimentos encontrados principalmente na literatura, com a simulação no software que é de fácil acesso.

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica, utilizou-se a rede mundial de internet, livros, artigos, teses, dissertações, monografias entre outras fontes, sobre a operação unitária sistemas de bombeamento, dando ênfase a determinação do ponto de funcionamento e os fenômenos de cavitação.

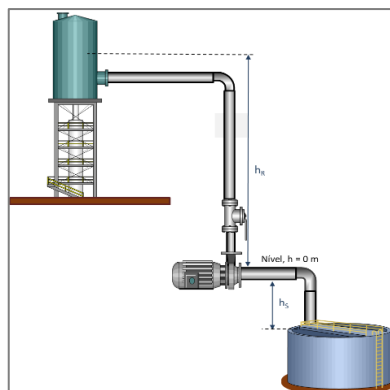
Com o estudo dos modelos matemáticos existentes na literatura, desenvolveu-se as equações de balanço de massa e de energia mecânica do sistema de bombeamentos. E a partir deste entendimento, utilizou-se um código computacional em Excel/VBA capaz de determinar o ponto de funcionamento para verificar se haverá ou não o fenômeno de cavitação.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO DA PLATAFORMA

O software foi desenvolvido e disponibilizado para uso, pelo Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, discente na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Esta plataforma, desenvolvida no Excel utilizando o armazenamento de dados em células/planilhas, possui uma base de cálculos para determinar o ponto de funcionamento, partindo da equação de Bernoulli e das equações de balanço.

Neste estudo, todas as simulações, assim como os modelos de bombas disponibilizados na plataforma, são referentes a situações com bombas elevadas, conforme ilustrado na Figura 7. Na sequência são apresentadas as principais partes do aplicativo computacional utilizado.

Figura 7 – Instalação de um sistema elevatório

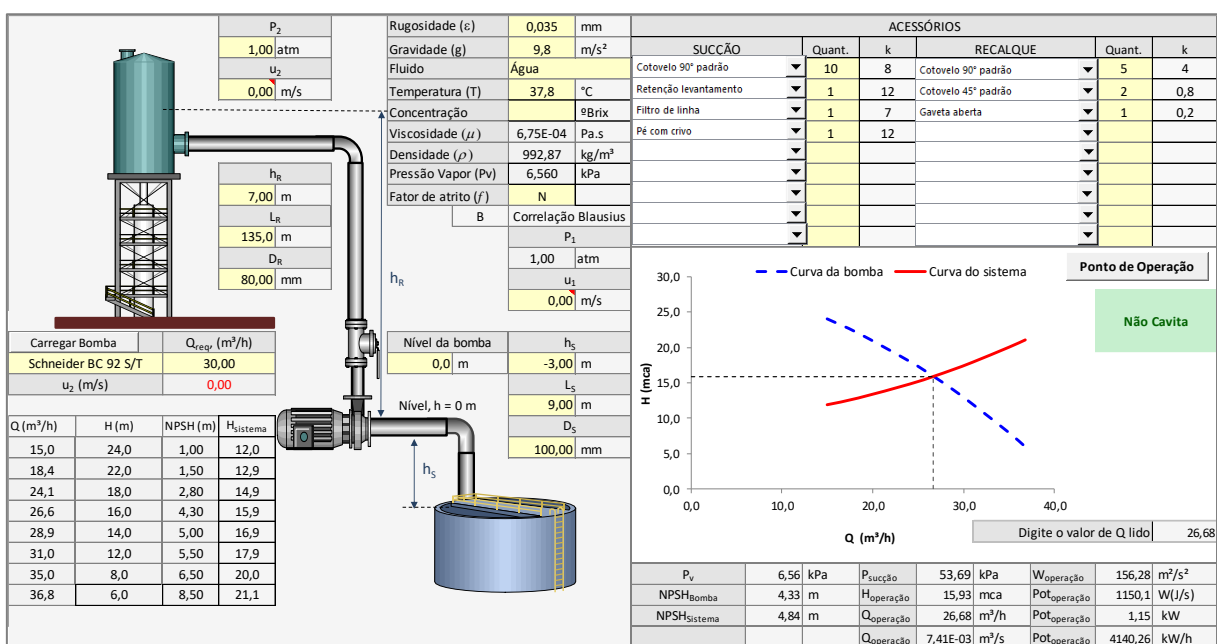


Fonte: Elaborado pela autora

### Entrada de dados iniciais

Na tela inicial, Figura 8, adiciona-se os dados de entrada da situação problema. Nela são atribuídos os dados das tubulações de sucção e de recalque, os acessórios (válvulas, joelho ou cotovelos, propriedades físico-químicas do fluido, bomba hidráulica, entre outras). Esta tela apresenta simultaneamente os resultados obtidos na forma gráfica (curvas do sistema e da bomba centrífuga utilizada) e nas células os valores obtidos.

Figura 8 - Tela inicial do programa



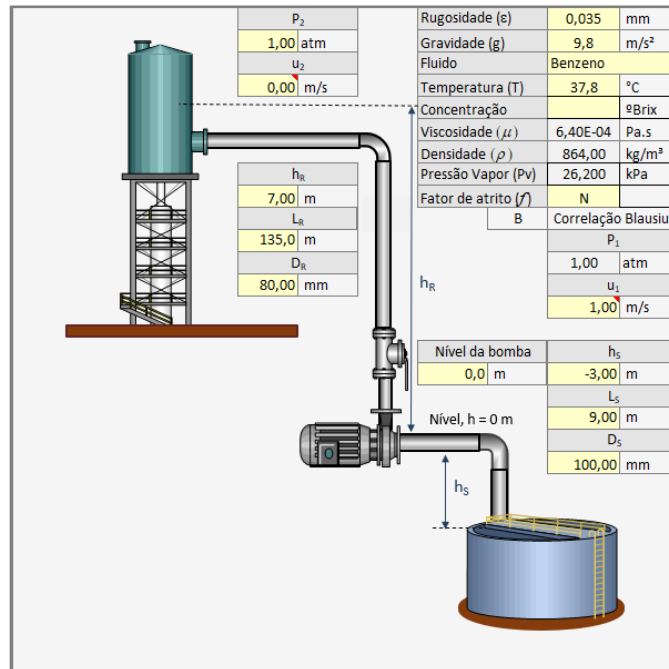
Fonte: Elaborado pela autora

O usuário também tem à disposição as equações de Blasius e de Churchill para o cálculo do fator de atrito, que pode ser definido na interface quando o regime de escoamento for turbulento. Se regime laminar, utiliza-se  $f = 16/Re$ . Pôde-se, ainda, considerar ou não os termos da energia cinética da equação de Bernoulli. Para considerar este termo atribui-se o valor igual a 1 nas células ou em uma delas. O valor nulo desconsidera o termo da energia cinética.

No banco de dados da plataforma, alguns fluidos estão cadastrados com suas respectivas características físico-químicas. Logo, na tela dos dados iniciais existe uma célula para adicionar o fluido que será utilizado, para que suas características sejam consideradas na rotina de cálculo. A Figura 9, ilustra o detalhe da tela inicial onde são definidas as dimensões das tubulações de sucção e recalque, fluido e suas

propriedades físico-químicas, pressão de vapor, rugosidade da tubulação e escolha da correlação para estimar o fato de atrito.

Figura 9 - Tela de inserção das configurações das tubulações e do fluido



Fonte: Elaborado pela autora

### **Escolha da bomba**

A plataforma possui uma base de dados, com informações de algumas bombas centrífugas (vazão, carga, NPSH) ou, ainda, atribuindo outros dados pelo usuário, representando a curva característica da bomba, conforme ilustrado na Figura 10. Na Figura 11 está representado o formato do banco de dados das bombas hidráulicas.

Após a seleção da bomba desejada deve-se carregar as informações da base de dados para a planilha de cálculo acionando o botão "Carregar bomba", Figura 10, que possibilita acionar o código em VBA (macro) e os dados necessários referentes ao modelo, apresentando na tabela abaixo os valores da vazão, carga e NPSH da bomba escolhida. Nesta mesma tabela tem-se o valor da carga do sistema ( $H_{\text{sistema}}$ ) de tubulação definida pelo usuário.

Figura 10 – Tela para escolha da bomba e apresentação de resultados

Carregar Bomba		$Q_{req.}$ (m <sup>3</sup> /h)	
Schneider BC 92 S/T		30,00	
$u_2$ (m/s)		0,00	
Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)	NPSH (m)	$H_{sistema}$
15,0	24,0	1,00	12,0
18,4	22,0	1,50	12,9
24,1	18,0	2,80	14,9
26,6	16,0	4,30	15,9
28,9	14,0	5,00	16,9
31,0	12,0	5,50	17,9
35,0	8,0	6,50	20,0
36,8	6,0	8,50	21,1

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 11 – Base de dados de catálogos das bombas

Bombas	KSB E 3000.1		KSB K 3000		KSB FI 1000.1		KSB 1500.1N		Dancor W-4C 1/2		Dancor W-4C 1/3		Dancor W-4C 1/4		Dancor CP-4C 1/5	
	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H
KSB E 3000.1	9,000	19,000	12,000	14,000	1,900	13,000	2,700	25,000	1,200	20,400	0,900	18,000	0,300	16,000	5,600	22,000
KSB K 3000	16,000	17,000	19,000	13,000	7,500	11,000	3,900	24,000	2,500	18,000	2,600	16,000	1,800	14,000	6,500	20,000
KSB FI 1000.1	23,000	15,000	26,000	12,000	12,000	9,000	4,800	23,000	3,900	16,000	3,900	14,000	3,400	12,000	7,100	18,000
KSB 1500.1N	30,000	13,000	32,000	11,000	14,000	8,000	6,900	21,000	5,200	14,000	5,000	12,000	4,900	10,000	7,700	16,000
Dancor W-4C 1/2	36,000	11,000	37,000	10,000	15,800	7,000	9,600	18,000	6,200	12,000	6,000	10,000	6,000	8,000	8,200	14,000
Dancor W-4C 1/3	43,000	9,000	42,000	9,000	17,300	6,000	12,000	15,000	7,000	10,000	6,900	8,000	7,000	6,000	8,600	12,000
Dancor W-4C 1/4	50,000	7,000	45,500	8,000	21,300	4,000	14,400	12,000	7,700	8,000	7,700	6,000	7,500	5,000	9,000	10,000
Dancor CP-4C 1/5	56,000	5,000	49,000	7,000	22,500	2,000	16,500	9,000	8,300	6,000	8,500	4,000	7,700	4,000	9,300	8,000
Schneider BCR 2010 1/2	NPSH		NPSH		NPSH		NPSH		NPSH		NPSH		NPSH		NPSH	
Schneider BCR 2000 1/4	9,000	1,19	12,000	1,20	1,900	1,30	2,700	2,38	1,200	1,50	0,900	1,60	0,300	1,70	5,600	1,80
Schneider BCR 2000 1/3	16,000	1,08	19,000	1,08	7,500	1,08	3,900	2,15	2,500	1,08	2,600	1,08	1,800	1,08	6,500	1,08
Ekaout	23,000	1,33	26,000	1,33	12,000	1,33	4,800	2,65	3,900	1,33	3,900	1,33	3,400	1,33	7,100	1,33
	30,000	1,99	32,000	1,99	14,000	1,99	6,900	3,98	5,200	1,99	5,000	1,99	4,900	1,99	7,700	1,99
	36,000	3,02	37,000	3,02	15,800	3,02	9,600	6,04	6,200	3,02	6,000	3,02	6,000	3,02	8,200	3,02
	43,000	4,00	42,000	4,00	17,300	4,00	12,000	8,01	7,000	4,00	6,900	4,00	7,000	4,00	8,600	4,00
	50,000	5,12	45,500	5,12	21,300	5,12	14,400	10,25	7,700	5,12	7,700	5,12	7,500	5,12	9,000	5,12
	56,000	6,43	49,000	6,43	22,500	6,43	16,500	12,85	8,300	6,43	8,500	6,43	7,700	6,43	9,300	6,43

Fonte: Elaborado pela autora

### Acessórios do sistema

Para completar o sistema de tubulação faz-se necessário definir os acessórios que o compõem (joelhos, luvas de união, tês, válvulas, entre outros). Esta etapa é realizada com auxílio da janela ilustrada na Figura 12, onde é selecionado o acessório e definido as devidas quantidades que correspondem as tubulações de sucção e recalque.

Figura 12 – Tela para seleção dos acessórios que compõem o sistema

ACESSÓRIOS					
SUCÇÃO	Quant.	k	RECALQUE	Quant.	k
Cotovelo 90° padrão	10	8	Cotovelo 90° padrão	5	4
Retenção levantamento	1	12	Cotovelo 45° padrão	2	0,8
Filtro de linha	1	7	Gaveta aberta	1	0,2
Pé com crivo	1	12			

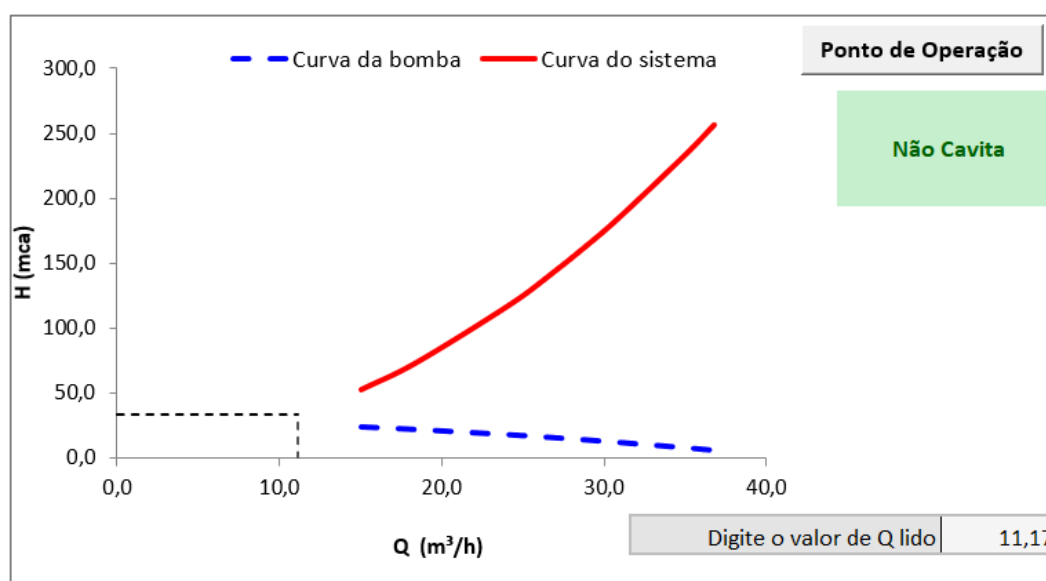
Fonte: Elaborado pela autora

### ***Curvas características da bomba e do sistema***

Na Figura 13 está ilustrado a representação gráfica das curvas características da bomba e do sistema com os dados da carga e vazão volumétrica apresentados na Figura 10. Ainda nesta figura, encontra-se um botão que permite efetuar o cálculo do ponto de funcionamento ou de operação do sistema-bomba.

Com o ponto de operação, é determinado o valor do NPSH do sistema aplicando a equação de Bernoulli entre a seção de entrada do sistema e a seção de entrada da bomba e, em seguida, é realizada a comparação deste valor com o valor do NPSH da bomba para verificação da possibilidade de haver ou não o fenômeno de cavitação. Se NPSH do sistema for maior que o fornecido pelo fabricante da bomba, diz-se que não há cavitação.

Figura 13 – Saída de dados gráfica e cálculo do ponto de operação



Fonte: Elaborado pela autora



### 3.2 CASO DE ESTUDO

Para ilustrar a aplicabilidade do software, foi definido um estudo de caso com as dimensões das tubulações de sucção e recalque ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados referentes as tubulações de sucção e recalque

<b>Região</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Sucção</b>	Nível da bomba	0,0	m
	Altura de sucção	-3,0	m
	Comprimento	9,0	m
	Diâmetro	100	mm
<b>Recalque</b>	Altura	7,0	m
	Comprimento	135,0	m
	Diâmetro	80	m

Fonte: Elaborado pela autora

A pressão para as duas regiões é de 1 atm e escolhida a bomba Schneider BC 92 S/T, com uma vazão requerida de 20 m<sup>3</sup>/h.

O fluido transportado é a água adotando a correlação empírica de Churchill para determinar o fator de atrito para o valor da rugosidade ilustrada na Tabela 3. Nesta tabela são igualmente apresentadas as propriedades da água.

Tabela 3 - Parâmetros de propriedades do fluido

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<i>Rugosidade (e)</i>	0,035 mm
<i>Gravidade (g)</i>	9,8 m/s <sup>2</sup>
<i>Fluido</i>	Água
<i>Temperatura (T)</i>	37,8 °C
<i>Viscosidade (m)</i>	6,75E-04 Pa.s
<i>Densidade (r)</i>	992,87 kg/m <sup>3</sup>
<i>Pressão Vapor (Pv)</i>	6,560 kPa
<i>Fator de atrito (f)</i>	N

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 14 estão representados os acessórios e a quantidade de cada acessório utilizado para este caso de estudo.

Figura 14 – Acessórios que compõe o sistema

ACESSÓRIOS					
SUCÇÃO	Quant.	k	RECALQUE	Quant.	k
Cotovelo 90° padrão	10	8	Cotovelo 90° padrão	5	4
Retenção levantamento	1	12	Cotovelo 45° padrão	2	0,8
Filtro de linha	1	7	Gaveta aberta	1	0,2
Pé com crivo	1	12			

Fonte: Elaborado pela autora

À medida que estão sendo definidos os parâmetros e variáveis do sistema, os cálculos são realizados simultaneamente empregando as equações da continuidade e de energia mecânica ou de Bernoulli, com exceção do ponto de funcionamento ou de operação. Esta tarefa é realizada ao acionar o botão “Ponto de operação” ilustrado na Figura 13. Em seguida, aciona-se a macro para iniciar os cálculos do ponto de operação. E, por fim, apresentar o resultado que será discutido no item 4.1.

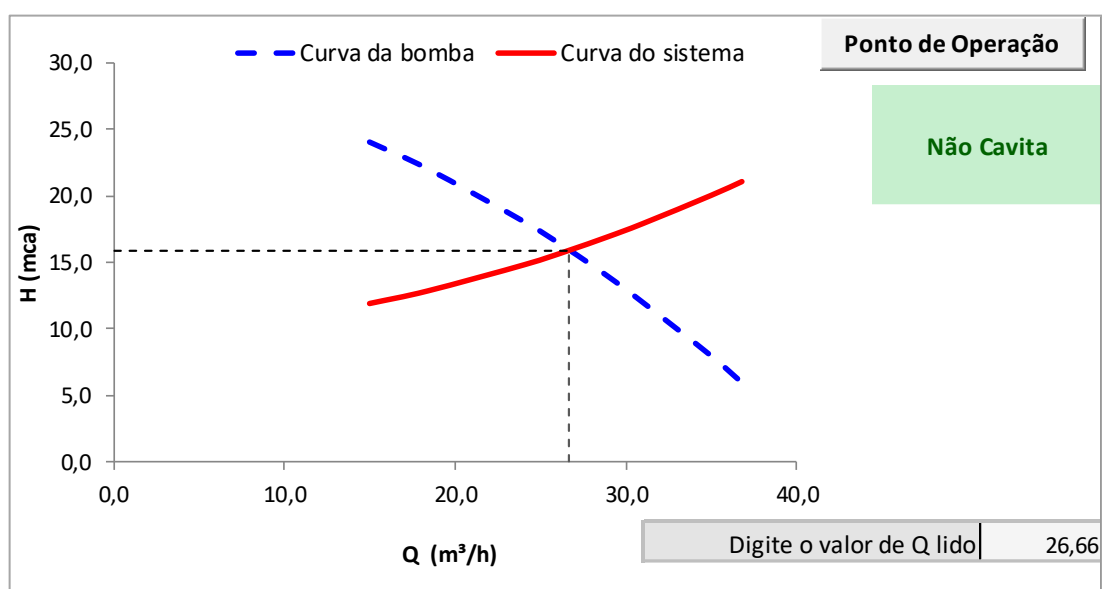
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização do aplicativo para esse trabalho, proporcionou resolução de vários casos de estudo por conta da facilidade na alteração dos parâmetros.

### 4.1 ESTUDO DE CASO

Na Figura 15, estão representados os comportamentos das curvas características da bomba e do sistema, e a identificação do ponto de funcionamento ou de operação.

Figura 15 - Ponto de operação do sistema – bomba centrífuga



Fonte: Elaborado pela autora

A vazão no ponto de operação,  $Q = 26,66 \text{ m}^3/\text{h}$ , é maior do que o requerido pelo caso de estudo. Os resultados apresentados na Figura 16 indicam que para a bomba escolhida não há cavitação no ponto de operação, embasando a afirmação que a bomba centrífuga escolhida pode ser utilizada para efetuar o transporte da água através da tubulação, isso se dá porque o NPSH requerido pela bomba é menor do que o NPSH disponível pelo sistema.

Figura 16 – Variáveis de interesse determinadas no ponto de operação.

$P_v$	6,56	kPa	$P_{\text{sucção}}$	53,72	kPa	$W_{\text{operação}}$	156,17	$\text{m}^2/\text{s}^2$
$\text{NPSH}_{\text{Bomba}}$	4,32	m	$H_{\text{operação}}$	15,92	mca	$\text{Pot}_{\text{operação}}$	1148,1	W(J/s)
$\text{NPSH}_{\text{Sistema}}$	4,84	m	$Q_{\text{operação}}$	26,66	$\text{m}^3/\text{h}$	$\text{Pot}_{\text{operação}}$	1,15	kW
			$Q_{\text{operação}}$	7,40E-03	$\text{m}^3/\text{s}$	$\text{Pot}_{\text{operação}}$	4133,29	kW/h

Fonte: Elaborado pela autora

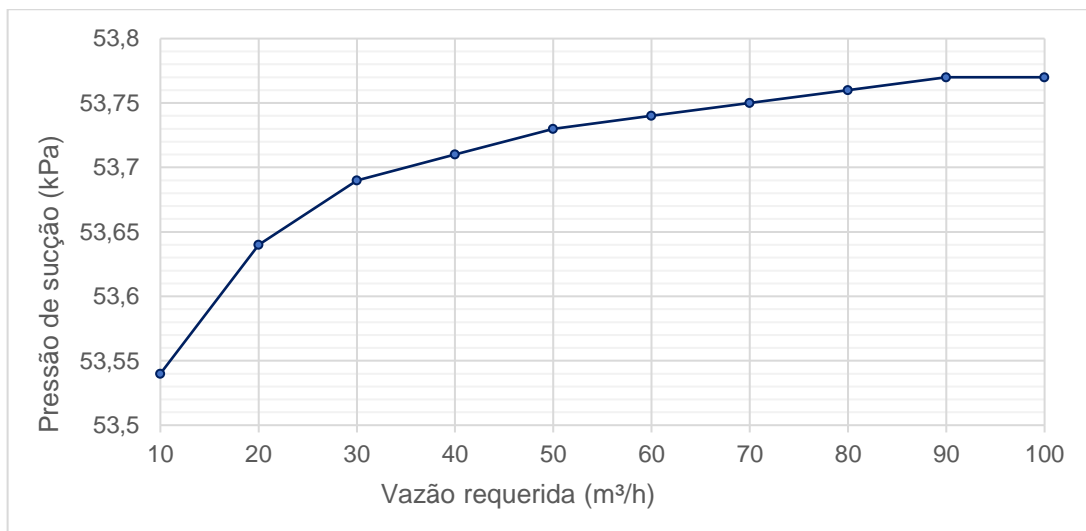
Por fim, neste estudo de caso o transporte elevatório ocorre satisfatoriamente, operando com uma potência de 1,15kW, uma pressão de sucção de 53,72kPa e uma altura manométrica de 15,92 mca.

#### 4.2 ANÁLISE DA VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO

Com o objetivo de avaliar a influência da vazão de alimentação sobre a pressão de sucção e o NPSH são apresentados nas Figuras 17 e 18.

Na Figura 17, tem-se o resultado da variação da vazão de alimentação de 10 m<sup>3</sup>/h a 100 m<sup>3</sup>/h e como resposta, a pressão de sucção varia de 53,55 kPa a, aproximadamente, 53,8 kPa. É visível, que esses parâmetros são diretamente proporcionais, logo, quanto maior a vazão maior a pressão de sucção.

Figura 17 – Pressão de sucção em função da vazão

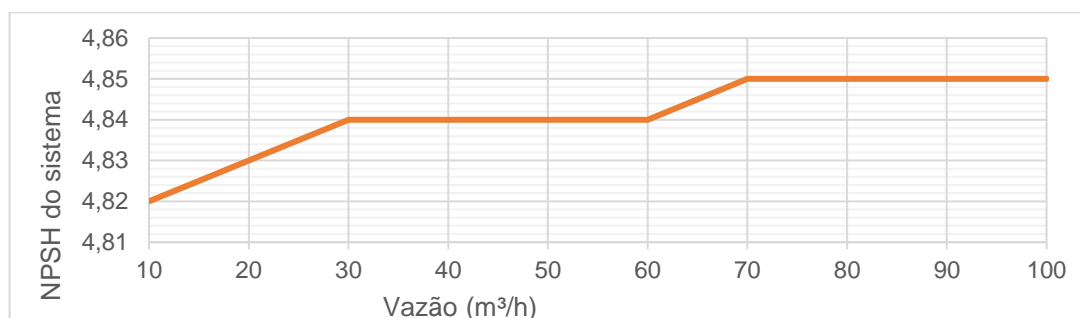


Fonte: Elaborado pela autora

Ao analisar este parâmetro observa-se que, com a vazão 10 vezes maior o aumento da pressão é menor que 0,3kPa, o equivalente a 0,003 bar, portanto conclui-se que a influência da vazão na pressão de sucção não gera impacto considerável no sistema.

Na Figura 18 está representado o comportamento do NPSH do sistema em função da vazão de alimentação. Estes resultados indicam que o NPSH apresenta uma tendência de aumentar com a vazão.

Figura 18 - NPSH do sistema em função da vazão de alimentação



Fonte: Elaborado pela autora

O NPSH requerido pela bomba é igual a 4,32 m. Logo, considerando a simulação com um aumento de 10x na vazão requerida, independente da faixa que o NPSH do sistema flutue, o NPSH requerido será menor que o NPSH disponível, mostrando que dentro da variação de vazão não haverá cavitação com as condições pré-definidas.

#### 4.3 INFLUÊNCIA DOS DIÂMETROS DE SUCÇÃO E DE RECALQUE SOBRE O PONTO DE OPERAÇÃO

Determinou-se a simulação apresentada no item 3.2 como padrão, um diâmetro de sucção igual a 100 mm e um diâmetro de recalque igual a 80 mm. Para avaliar o efeito do diâmetro no ponto de operação, foram definidas duas situações, a primeira variando o diâmetro de sucção e fixando os outros parâmetros e, a segunda alterando os valores do diâmetro de recalque.

Na Tabela 4 e na Figura 19 estão representados os valores do ponto de operação em função do diâmetro de sucção e a condição de haver ou não o fenômeno de cavitação.

Tabela 4 - Simulação para avaliar o efeito do diâmetro de sucção

<b>Simulação</b>	<b>Diâmetro de sucção (mm)</b>	<b><math>Q_{Op}</math> (m³/h)</b>	<b>Cavitação</b>
I	40	12,54	Não cavita
II	50	16,29	Cavita
III	60	20,24	Cavita
IV	70	22,96	Cavita
V	80	24,77	Cavita
VI	90	25,94	Cavita
VII	100	26,68	Não cavita
VIII	110	27,16	Não cavita
IX	120	27,48	Não cavita
X	130	27,49	Não cavita

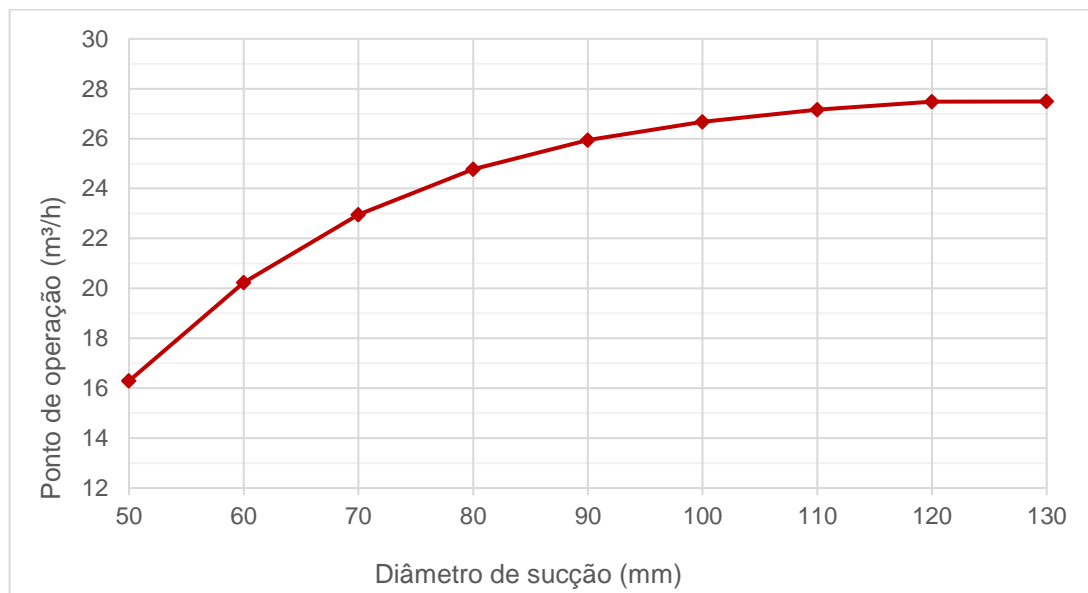
Fonte: Elaborado pela autora

Referente a determinação do ponto de operação para cada um dos diâmetros de sucção estão representados graficamente no Apêndice I.

Nas simulações II a VI, existe a presença o fenômeno de cavitação, ou seja, a vaporização do líquido e formação de bolhas na entrada da bomba, podendo danificar o rotor e colapsar o transporte do fluido, pois nestes casos, o NPSH disponível é menor que o requerido. No entanto, para as análises VII a X, encontra-se a melhor configuração para o diâmetro do sistema do ponto de vista da cavitação.

Analisando a Figura 19 observa-se que quanto maior o diâmetro de sucção maior a vazão de operação do sistema, apresentando uma curva com tendência ascendente no ponto de operação com o aumento do diâmetro de sucção.

Figura 19 - Ponto de operação em função do diâmetro de sucção



Fonte: Elaborado pela autora

Pelo gráfico de resultados, é perceptível que ao longo da curva ela tende a um patamar estável. Portanto, para uma decisão assertiva o ponto de vista econômico pode ser um diferencial nesta de tomada de decisão, tendo em vista que, aumentar diâmetro do duto para obter um aumento de 0,01 m³/h não é um cenário favorável.

Por fim, com as considerações feitas, conclui-se que para as configurações deste caso e um diâmetro de recalque igual a 80 mm, o diâmetro de sucção ideal está entre 100 e 120 mm, sendo esta última dimensão o limite máximo.

Na Tabela 5 e na Figura 20 estão representados os valores do ponto de operação em função do diâmetro de recalque e a condição de haver ou não o fenômeno de cavitação.

Tabela 5 - Simulação para avaliar o efeito do diâmetro de recalque

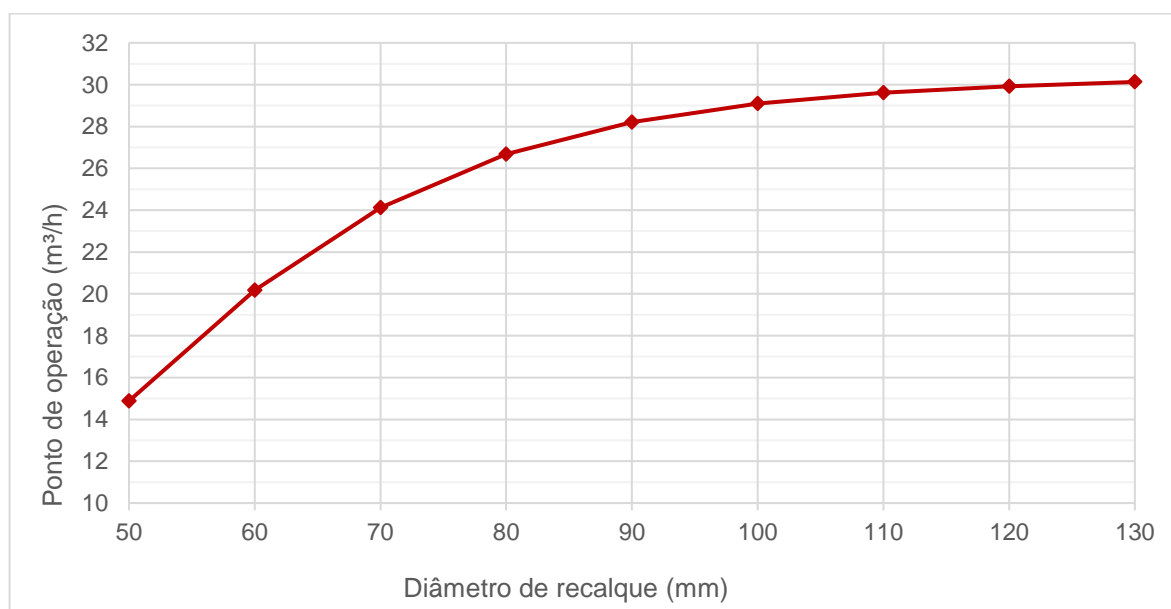
<b>Simulação</b>	<b>Diâmetro de recalque (mm)</b>	<b><math>Q_{Op}</math> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Cavitação</b>
<b>XI</b>	40	11,17	Não cavita
<b>XII</b>	50	14,88	Não cavita
<b>XIII</b>	60	20,18	Não cavita
<b>XIV</b>	70	24,12	Não cavita
<b>XV</b>	80	26,68	Não cavita
<b>XVI</b>	90	28,21	Cavita
<b>XVII</b>	100	29,09	Cavita
<b>XVIII</b>	110	29,61	Cavita
<b>XIX</b>	120	29,93	Cavita
<b>XX</b>	130	30,13	Cavita

Fonte: Elaborado pela autora

A determinação do ponto de operação para cada um dos diâmetros de recalque, estão representados graficamente no Apêndice II.

Os resultados apresentados na Figura 20 indicam que, quanto maior o diâmetro de recalque maior a vazão de operação do sistema.

Figura 20 - Ponto de operação em função do diâmetro de recalque



Fonte: Elaborado pela autora

Estes resultados indicam que o ponto de operação tende a ficar praticamente constante para diâmetro de recalque superior 90mm.

Ao dimensionar, projetar e instalar um sistema de bombeamento elevatório não é comum ter a troca das tubulações ao ponto de ocorrer variações de diâmetro.

Todavia, o estudo de variação dos diâmetros de sucção e recalque, possui validade na avaliação do fenômeno de incrustação ao longo do duto. Fenômeno que pode ser ocasionado pela deposição de sais presentes na água, por exemplo, e, dependendo do fluido a ser transportado e de sua origem, este pode ser bombeado com matérias sólidas que acabam por depositar-se ao longo do duto, ocasionando a incrustação.

Por exemplo, um sistema de bombeamento elevatório para captar e transportar água de um açude para reservatórios de tratamento e logo após distribuição e abastecimento de uma cidade. Nesta situação, a água a ser succionada do açude poderá vir com materiais sólidos, como por exemplo, terra, areia e até possíveis pedras, acarretando um depósito desses materiais ao longo do duto e originando a incrustação e diminuição da tubulação.

Como observado, a alteração dos diâmetros do projeto demuda diretamente o ponto de funcionamento do motor bomba e, como o fenômeno de incrustação tende a apenas diminuir o tamanho do duto, resultando na diminuição da vazão de operação do sistema, afetando rendimento do meu processo.

No funcionamento de um sistema de bombeamento, o indicativo mais viável para mensurar este problema é a diminuição da vazão de operação na região de sucção, pois quanto menor este diâmetro, menor a vazão de sucção e alteração do NPSH do sistema, originando também o fenômeno de cavitação onde a bomba não opera em suas condições normais, podendo ocasionar problemas mecânicos e provocando a necessidade de uma manutenção corretiva ou até uma troca de equipamento.

#### 4.4 EFEITO DO DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO SOBRE A POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO

Esta seção tem por objetivo avaliar a influência da variação dos diâmetros de sucção e recalque sobre a potência de bombeamento. Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os valores da potência de bombeamento determinada para os diferentes casos avaliados com diâmetros de sucção e recalque, respectivamente.



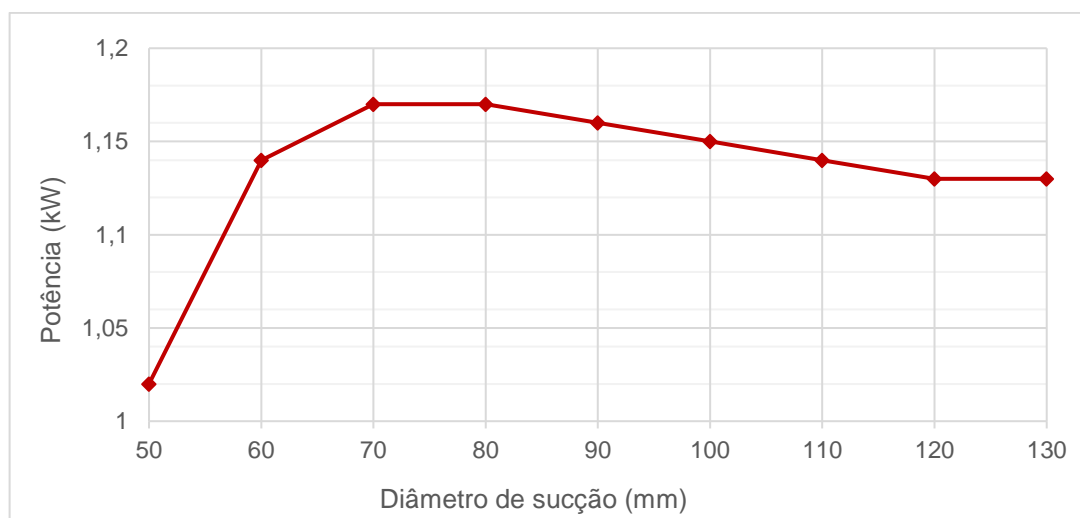
Tabela 6 - Resultados da potência de operação com a variação do diâmetro de sucção

<b>Simulação</b>	<b>Diâmetro de sucção (mm)</b>	<b>Q<sub>Op</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Potência (kW)</b>
<b>I</b>	40	12,54	0,95
<b>II</b>	50	16,29	1,02
<b>III</b>	60	20,24	1,14
<b>IV</b>	70	22,96	1,17
<b>V</b>	80	24,77	1,17
<b>VI</b>	90	25,94	1,16
<b>VII</b>	100	26,68	1,15
<b>VIII</b>	110	27,16	1,14
<b>IX</b>	120	27,48	1,13
<b>X</b>	130	27,49	1,13

Fonte: Elaborado pela autora

Compreende-se que à região de sucção, a faixa de diâmetro para este projeto está entre 100 mm e 130 mm, simulações VII a X da Tabela 6, pois como mencionado anteriormente, com diâmetro abaixo dessa faixa o motor bomba não opera em condições normais, para a situação avaliada neste trabalho. Sendo assim, essa informação deve ser considerada ao analisar a Tabela 6, para encontrar a melhor faixa de potência no bombeamento. Portanto, para a região de sucção a potência de operação encontra-se entre 1,13 kW e 1,15 kW. A Figura 21, apresenta a curva de tendência da potência em função do diâmetro de sucção.

Figura 21 - Gráfico da potência em função do diâmetro de sucção



Fonte: Elaborado pela autora

É possível observar que o ponto de maior potência no sistema, ocorre com o diâmetro de sucção entre 70 mm e 80 mm. Entretanto, nessa faixa, o sistema opera com a presença do fenômeno de cavitação, para que isto não ocorra será necessário operar com diâmetro acima de 100 mm, logo o ponto de maior potência é com o diâmetro igual a 100 mm. A Tabela 7, apresenta os resultados referentes a variação do diâmetro de recalque.

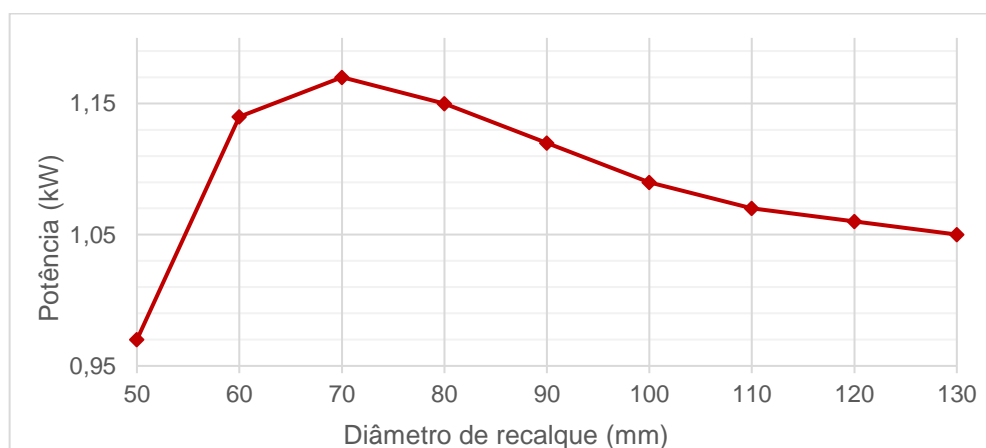
Tabela 7 - Resultados da potência de operação com a variação do diâmetro de recalque

<b>Simulação</b>	<b>Diâmetro de recalque (mm)</b>	<b><math>Q_{Op}</math> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Potência (kW)</b>
<b>XI</b>	40	11,17	1,03
<b>XII</b>	50	14,88	0,97
<b>XIII</b>	60	20,18	1,14
<b>XIV</b>	70	24,12	1,17
<b>XV</b>	80	26,68	1,15
<b>XVI</b>	90	28,21	1,12
<b>XVII</b>	100	29,09	1,09
<b>XVIII</b>	110	29,61	1,07
<b>XIX</b>	120	29,93	1,06
<b>XX</b>	130	30,13	1,05

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 22, está representado a potência de bombeamento em função do diâmetro de recalque. Observa-se que a potência máxima é atingida para o diâmetro de 70 mm. Para valores superiores nota-se uma redução lenta da potência mais lentamente do que é observado para diâmetros inferior a 70 mm, dentro da faixa de diâmetros avaliados.

Figura 22 - Gráfico da potência em função do diâmetro de recalque



Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.5 EFEITOS DOS DIÂMETROS DE SUCÇÃO E RECALQUE SOBRE O NPSH

Como o NPSH é um dos principais parâmetros a ser observado ao transportar fluidos utilizando bombas hidráulicas e, em especial, ao analisar o fenômeno de cavitação, foram realizadas simulações variando o diâmetro da região de sucção e de recalque, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - NPSH em função da variação do diâmetro de sucção

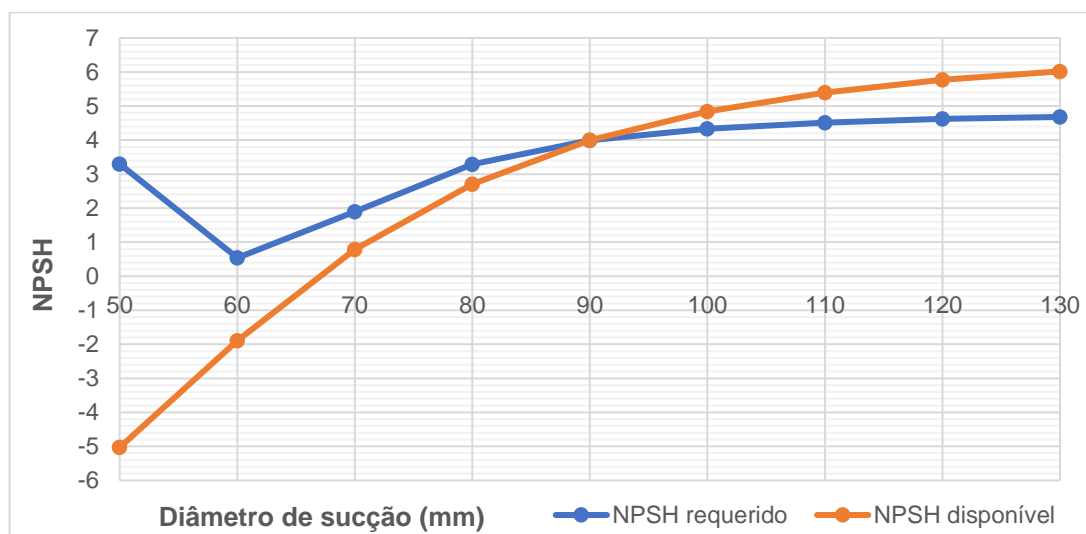
<b>Simulação</b>	<b>Diâmetro de sucção (mm)</b>	<b>NPSH bomba</b>	<b>NPSH sistema</b>	<b>Cavitação</b>
<b>I</b>	40	-36,30	-10,67	Cavita
<b>II</b>	50	3,3	-5,03	Cavita
<b>III</b>	60	0,54	-1,89	Cavita
<b>IV</b>	70	1,9	0,79	Cavita
<b>V</b>	80	3,29	2,71	Cavita
<b>VI</b>	90	3,99	3,99	Cavita
<b>VII</b>	100	4,33	4,84	Não Cavita
<b>VIII</b>	110	4,51	5,4	Não Cavita
<b>IX</b>	120	4,62	5,77	Não Cavita
<b>X</b>	130	4,68	6,02	Não Cavita

Fonte: Elaborado pela autora

A fim de obter uma melhor visualização dos resultados nos gráficos apresentados na Figura 23, o resultado da simulação 1 foi omitida para ambas simulações, tendo em vista que, não existe ponto de operação com a variação do diâmetro de sucção de 100 para 40 mm, mesmo que o aplicativo apresentando a informação da bomba como “não cavita”, vale ressaltar que para esta simulação não existe ponto de operação.

Os resultados das simulações II à VI, representados na Figura 23 indicam que o NPSH do sistema é menor ou igual ao disponibilizado pelo fabricante da bomba, por isso nesses pontos o fenômeno de cavitação vai ocorrer, pois o valor da energia que existe no flange de sucção da bomba é maior do que a energia do sistema, logo ao operar, a água entrará em processo de vaporização e bolhas de vapor poderão surgir na entrada da bomba interrompendo a circulação do fluido.

Figura 23 - NPSH em função da variação do diâmetro de sucção



Fonte: Elaborado pela autora

Logo, esta situação onde o diâmetro de sucção varia entre 50 e 90 mm e o de recalque é igual a 80 mm não deve ser projetada e utilizada, entretanto, pode ocorrer uma incrustação ao longo do duto e o gráfico confirma que quando o diâmetro atingir estas condições, para este cenário, haverá problemas no funcionamento do sistema.

Na Tabela 9 e Figura 24, estão representados o comportamento do NPSH em função do diâmetro de recalque, considerando o diâmetro de sucção igual a 100 mm.

Tabela 9 - Resultados do NPSH em função da variação do diâmetro de recalque

<b>Simulação</b>	<b>Diâmetro de recalque (mm)</b>	<b>NPSH bomba</b>	<b>NPSH sistema</b>	<b>Cavitação</b>
<b>XI</b>	40	-	6,4	Não cavita
		102,09		
<b>XII</b>	50	0,4	6,14	Não cavita
<b>XIII</b>	60	0,54	5,65	Não cavita
<b>XIV</b>	70	2,82	5,18	Não cavita
<b>XV</b>	80	4,33	4,84	Não cavita
<b>XVI</b>	90	4,83	4,62	Cavita
<b>XVII</b>	100	5,05	4,48	Cavita
<b>XVIII</b>	110	5,17	4,4	Cavita
<b>XIX</b>	120	5,24	4,35	Cavita
<b>XX</b>	130	5,29	4,32	Cavita

Fonte: Elaborado pela autora

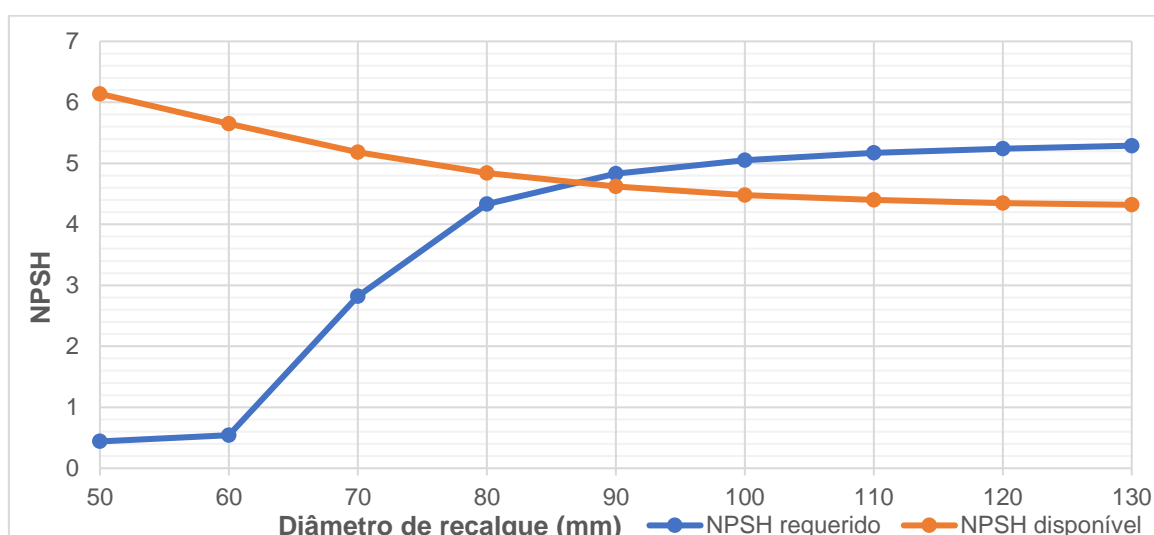
Assim como nas simulações com variação do diâmetro de sucção, a primeira análise, simulação XI, diâmetro de recalque é igual a 40 mm não há ponto de

operação, pois neste ponto a curva do sistema e a curva da bomba não se cruzam logo, nesta análise foi desconsiderado e não representado na Figura 24.

Como era esperado, o comportamento da curva do NPSH do sistema de tubulação e bomba apresentam uma variação com o diâmetro da tubulação de recalque bem menor do que se observa com o diâmetro de sucção (Figura 23), motivo pelo qual é verificado se o sistema cavita ou não, para a bomba hidráulica utilizada, pelo balanço de energia mecânica no trecho de tubulação referente a região de sucção.

Como pode ser observado na Figura 24, para valores de diâmetro de recalque, acima de 87 mm tem-se o NPSH requerido maior que o NPSH disponível pelo sistema, não configurando um cenário operacional válido.

Figura 24 - Gráfico do NPSH em função da variação do diâmetro de recalque



Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, diante dos resultados das diferentes simulações avaliadas no presente trabalho ratifica-se que para não haver cavitação o valor do NPSH calculado no trecho de tubulação da região de sucção deve ser sempre maior do que o disponibilizado pelo fabricante da bomba. Esta informação assegura que o líquido não entre em vaporização nas condições de temperatura e pressão do sistema evitando, assim, o fenômeno de cavitação.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados das diferentes situações avaliadas ratificam que o ponto de operação depende de vários parâmetros, como por exemplo, diâmetro de sucção e recalque, rugosidade, propriedades dos fluidos, tipo e número de conexões utilizadas, dentre outros. Além disso, valida que para não haver cavitação o valor do NPSH na região da tubulação de sucção deve ser sempre maior do que o disponibilizado pelo fabricante da bomba.

A potência requerida pelo sistema de tubulação e bomba centrífuga mostrou-se dependente dos diâmetros de sucção e recalque indicando ser mais sensível a variação do diâmetro da tubulação de recalque.

Os resultados obtidos condizem com os reportados na literatura, ilustrando a utilidade do aplicativo tanto para ser objeto de estudo na formação de novos engenheiros como para facilitar a escolha de um motor bomba para uma aplicação específica.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho foi realizado com o intuito de utilizar os conceitos da mecânica dos fluidos aplicado a sistemas de bombeamento em regime permanente, conhecimento visto nas disciplinas de Fenômenos de transporte I e Operações Unitárias I, associado a plataforma do Excel/VBA da Microsoft. A união desses conhecimentos, entrega ao usuário da plataforma uma experiência simples cheia de embasamento teórico.

As teorias apresentadas como balanço de massa, de energia, equação de Bernoulli, os cálculos das perdas de carga e todas as equações matemáticas estudadas na revisão, tornam-se a base de cálculo do aplicativo, proporcionando ao usuário um tempo maior nas análises dos parâmetros com uma maior facilidade na compreensão e fixação dos assuntos.

Com o avanço da tecnologia e a intensidade dos estudos voltados para as linguagens computacionais, acredita-se que outros aplicativos sejam desenvolvidos. E para o software utilizado, espera-se o aprimoramento da plataforma e a inserção de outras equações no aplicativo, como por exemplo, a análise econômica e as equações de transferência de calor, tornando-o mais robusto e podendo tornar-se um software comercial, atuando no auxílio dos profissionais de projetos hidráulicos.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Adicionar ao software o cálculo de análise econômica;
- Criar uma interface que interaja com o usuário, tornando a plataforma mais intuitiva;
- Realizar análise avaliando a influência troca de calor ao longo do sistema de bombeamento;



## REFERÊNCIAS

BAPTISTA, Márcio Benedito; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3ª. ed. rev. e aum. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 473 p.

BEZERRA, S. T.M; SILVA, S. A. S.; GOMES, H. P. Controle automático de pressão em sistemas de distribuição de água. In: GOMES, H. P. **Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética**. João Pessoa/PB: Editora Universitária – Universidade Federal da Paraíba, 2010. Cap 1, p. 9-30.

ÇENGEL, Y. and CIMBALA, J. **Fundamentals and Application**. McGraw-Hill. 2006.

CRANE, C.O. **Flow of Fluids Through Valves: Through valves, fittings and pipe**. Metric Edition. 1977.

FEGHALI, Artur Kasznar. **Análise de cavitação em bombas de alimentação de caldeiras de uma fábrica de bebidas e projeto de solução**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

FONSECA, Victor Ferreira da M. L. **Bombeamento de Fluidos**. Orientador: Professora Livia Chaguri. 2019. 49 p. Apostila - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena, Lorena/SP, 2019. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4583896/mod\\_resource/content/0/Bombas\\_Apostila\\_rev\\_Liv02.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4583896/mod_resource/content/0/Bombas_Apostila_rev_Liv02.pdf). Acesso em: 7 mar. 2021

FOUST, A. S, *et al.*; **Princípios das Operações Unitárias**. LTC: Rio de Janeiro, 2ª Edição, 1982.

GOMES, Gustavo Alvez Pinto Mosqueira. **Seleção de bomba centrífuga vertical para operação em um sistema de transferência de enxofre líquido**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

GONÇALVES, R. F. **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) e Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2009. 353 p.

GOUVEA, Marcos Martins Rezende. **Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas**. Universidade de São Francisco. 2008.

GOUVEIA, Roberta Macêdo Marques. **Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos**. 2012. 23-37 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/Paraíba, 2012. Disponível em: [http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/pesquisa-lenhs/2012-tese\\_roberta\\_macedo.pdf](http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/pesquisa-lenhs/2012-tese_roberta_macedo.pdf). Acesso em: 21 abr. 2021.

Macintyre, A.J. **Bombas e Instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro/RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1987.

OLIVEIRA, Janice Izabel de. **O uso de planilhas eletrônicas e da computação em nuvem na gestão de vagas em creche**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Informática Instrumental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. p. 64. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/197222/001097830.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 abr. 2021.

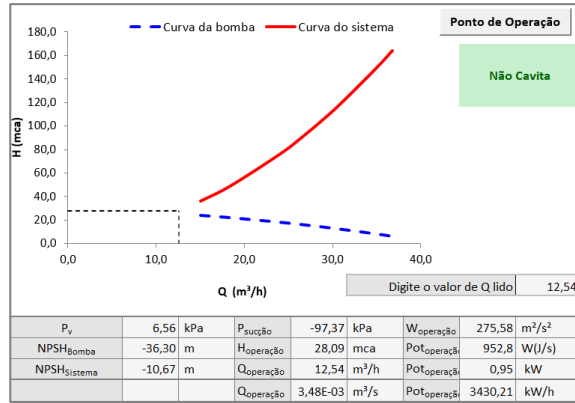
PROVENZANO, G.; PUMO D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigations and Drainage Engineering**, New York, v.130, n.4, p.318-324, 2004.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos-6**. AMGH Editora, 2010.

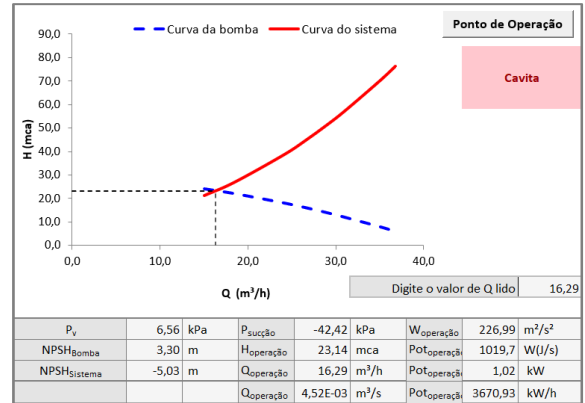
## APÊNDICE

### Apêndice I – Gráficos com os resultados da simulação variando o diâmetro de sucção

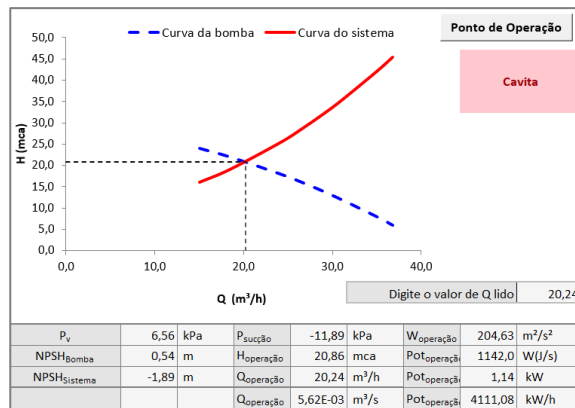
#### I. Diâmetro = 40mm



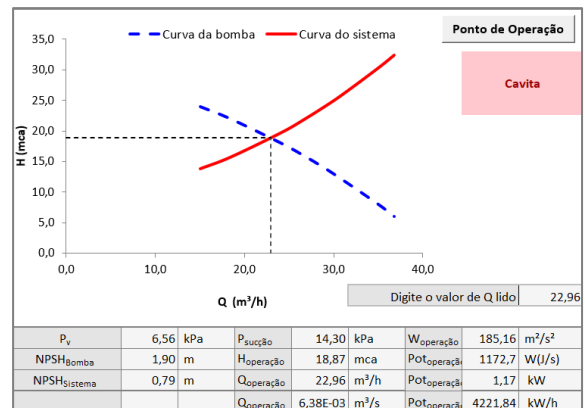
#### II. Diâmetro = 50mm



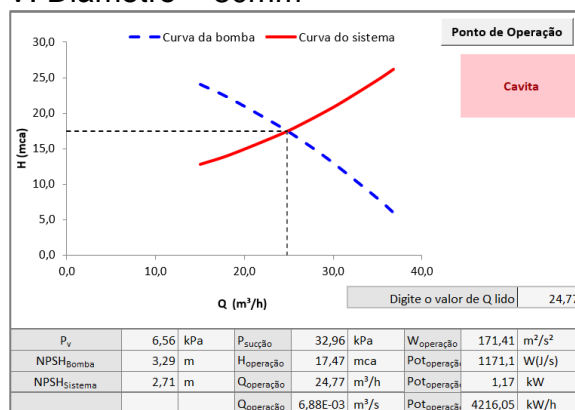
#### III. Diâmetro = 60mm



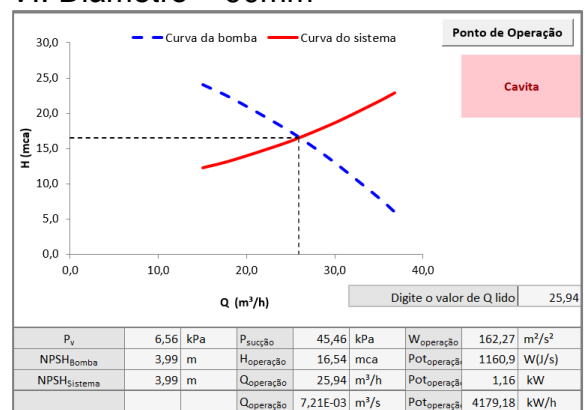
#### IV. Diâmetro = 70mm



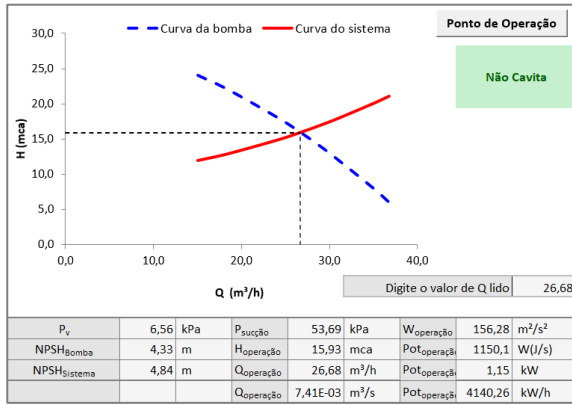
#### V. Diâmetro = 80mm



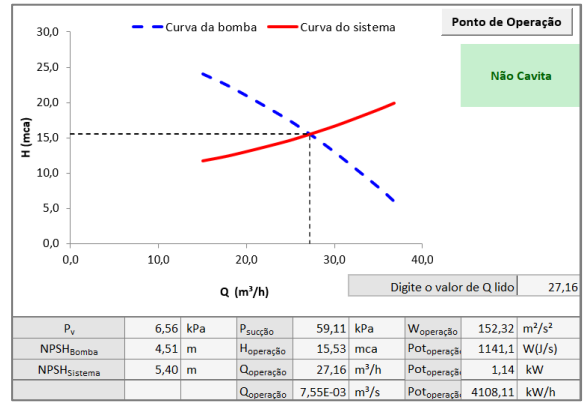
#### VI. Diâmetro = 90mm



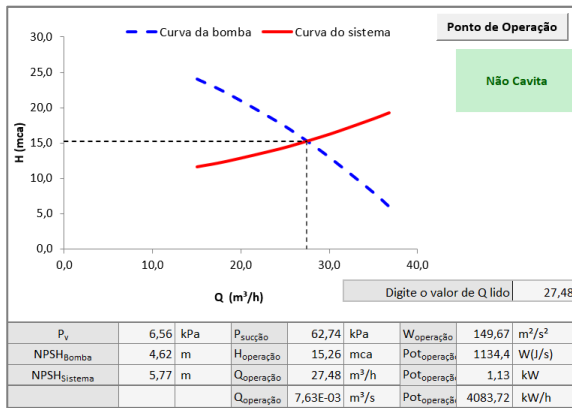
VII. Diâmetro = 100mm



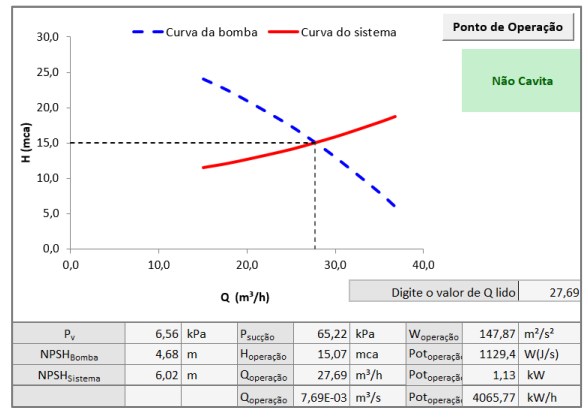
VIII. Diâmetro = 110mm



IX. Diâmetro = 120mm



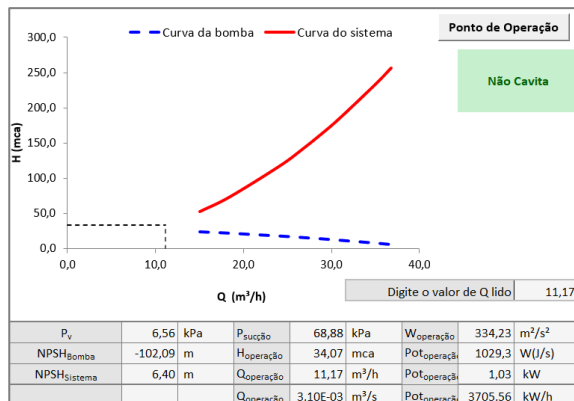
X. Diâmetro = 130mm



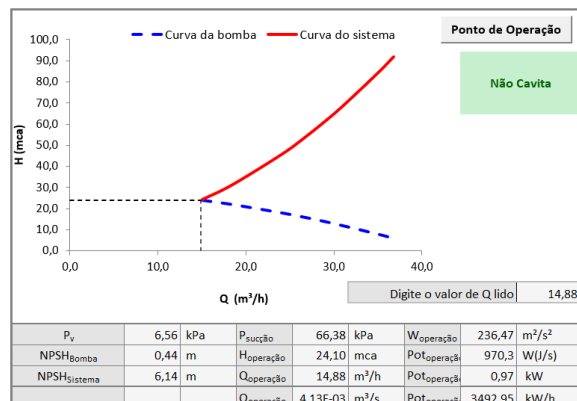
Fonte: Elaborado pela autora

## Apêndice II – Gráficos com os resultados da simulação variando o diâmetro de recalque

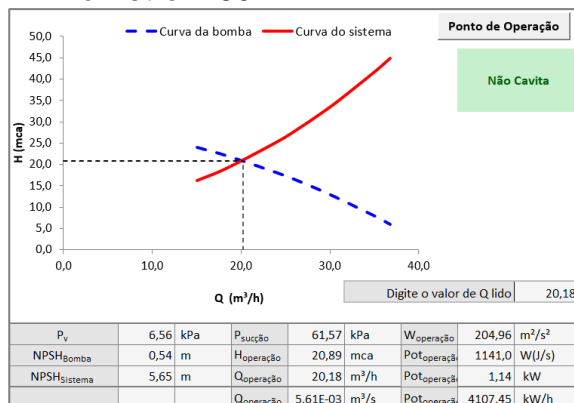
### I. Diâmetro = 40mm



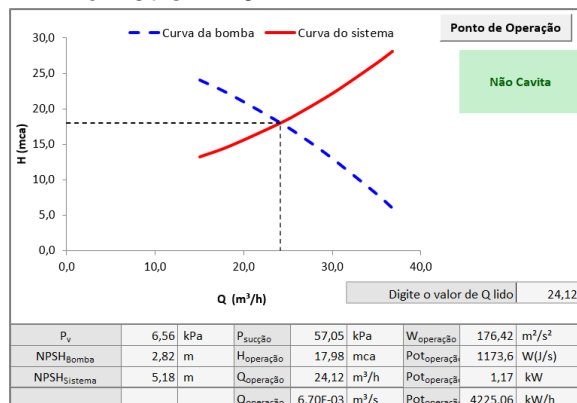
### II. Diâmetro = 50mm



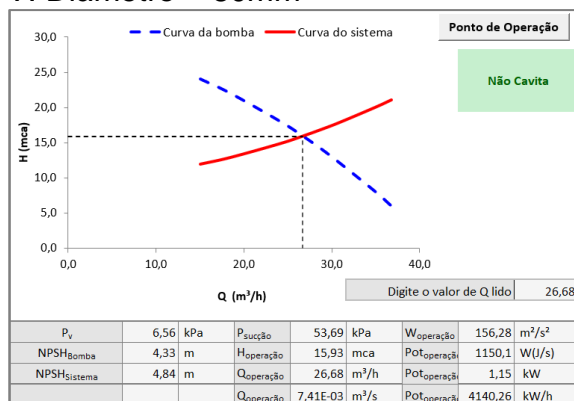
### III. Diâmetro = 60mm



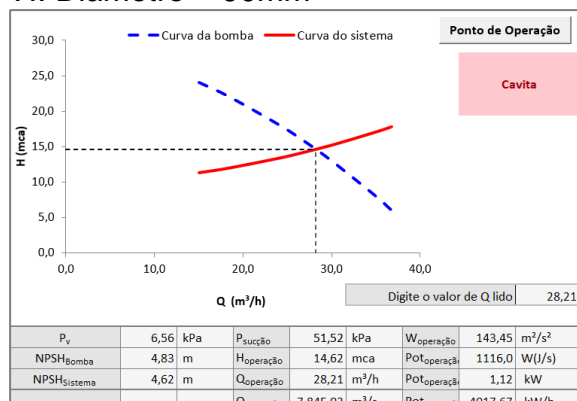
### IV. Diâmetro = 70mm



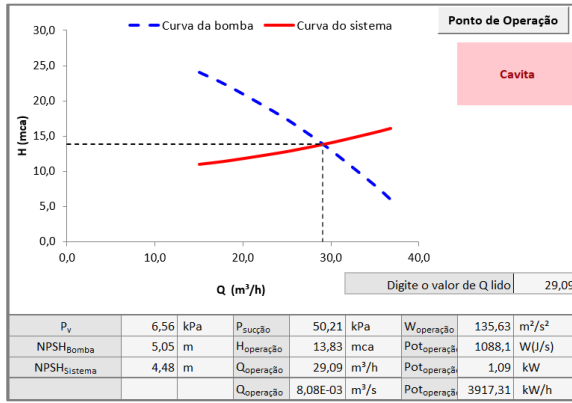
### V. Diâmetro = 80mm



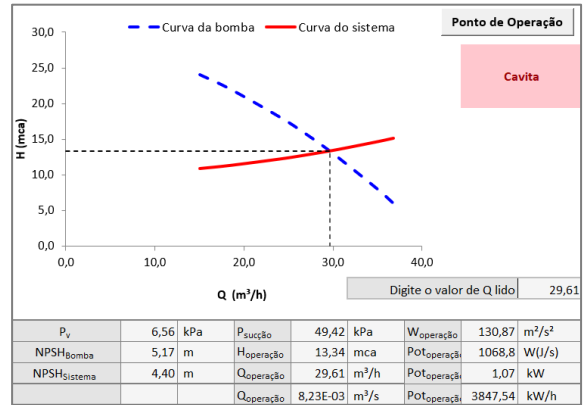
### VI. Diâmetro = 90mm



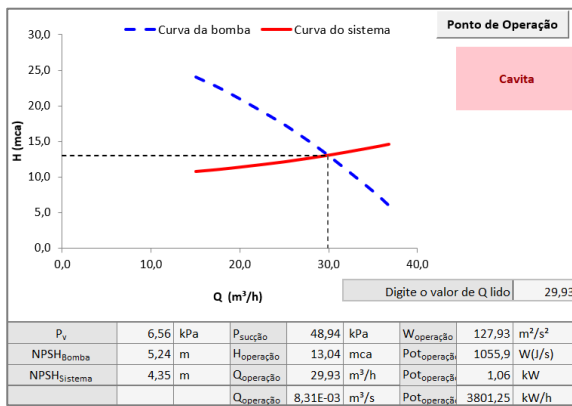
VII. Diâmetro = 100mm



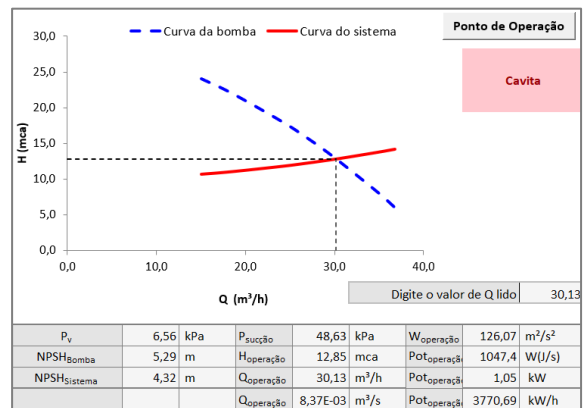
VIII. Diâmetro = 110mm



IX. Diâmetro = 120mm



X. Diâmetro = 130mm



Fonte: Elaborado pela autora