

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL**

DEPARTAMENTO DE INDÚSTRIA, SEGURANÇA E PRODUÇÃO CULTURAL

OLZIREB BENVINDO PEREIRA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA AUTOMATIZADA PARA
DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE BOMBA HIDRÁULICA EM DOIS
PATAMARES**

Teresina-PI

2022

OLZIREZ BENVINDO PEREIRA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA AUTOMATIZADA PARA
DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE BOMBA HIDRÁULICA EM DOIS
PATAMARES**

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para
obtenção do diploma do Curso de Bacharelado
em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.
Campus Teresina Central.

Orientador(a): Prof. Me. Anderson Felipe
Chaves Fortes.

Teresina-PI

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Pereira Neto, Olzires Benvindo
P436d Desenvolvimento de planilha automatizada para dimensionamento e
seleção de bomba hidráulica em dois patamares / Olzires Benvindo Pereira
Neto. - 2022.
48 f.: il. color.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2022.
Orientador : Prof Me. Anderson Felipe Chaves Fortes.
1. Bombas. 2. Planilha automática. 3. Reservatórios. 4. Perda de carga.
I. Título.

CDD-620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

OLZIREZ BENVINDO PEREIRA NETO

DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA AUTOMATIZADA PARA
DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE BOMBA HIDRÁULICA EM DOIS
PATAMARES

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para
obtenção do diploma do Curso de Bacharelado
em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.
Campus Teresina Central.

Orientador(a): Prof. Me. Anderson Felipe
Chaves Fortes.

Aprovado em: 09/03/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Anderson Felipe Chaves Fortes (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Antônio Ítalo Rodrigues Pedrosa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Janiel Fontineles Silva
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

RESUMO

As bombas foram criadas devido a necessidade de captar, transportar e armazenar água para centros populacionais distantes dos rios, Claudino (2020). Esse trabalho tem como objetivo criar uma planilha para dimensão e seleção de bomba hidráulica em dois patamares e, usa essa em uma aplicação prática a fim de uma melhor explicação e manuseio da planilha. A princípio, realizou-se a revisão bibliográfica, na qual foram utilizados livros base sobre bombas, instalações hidráulicas e mecânica dos fluidos. A aplicação prática adotada é do cultivo de soja em uma fazenda no Brasil que precisa abastecer dois reservatórios, um necessita de uma vazão 40 m³/h e o outro de 80 m³/h, em alturas diferentes a fim de suprir os requisitos necessários. A bomba escolhida foi a motobomba centrífuga monoestágio, rotor semiaberto, modelo MSA-21 R/F 2 1/2, com uma potência de 20 CV e motor Motor WEG IP-55, 2 polos, 60 Hz. Por último, o trabalho atingiu seu principal objetivo, construir uma planilha geral para dimensão e seleção de bomba hidráulica para o caso de dois reservatórios em alturas diferentes.

Palavras-chave: Bombas; planilha automática; reservatórios; perda de carga.

ABSTRACT

The pumps were created due to the need to capture, transport and store water to population centers far from rivers, Claudino (2020). This work aims to create a spreadsheet for dimensioning and selecting a hydraulic pump in two levels and uses this in a practical application in order to better explain and handle the spreadsheet. At first, a bibliographic review was carried out, in which basic books on pumps, hydraulic installations and fluid mechanics were used. The practical application adopted is the cultivation of soybeans on a farm in Brazil that needs to supply two reservoirs, one needs a flow of 40 m³/h and the other 80 m³/h, at different heights in order to meet the necessary requirements. The pump chosen was a single-stage centrifugal motor pump, semi-open rotor, model MSA-21 R/F 2 1/2, with a power of 20 hp and WEG IP-55 motor, 2 poles, 60 Hz. Finally, the work reached its main objective, building a general worksheet for dimensioning and selecting a hydraulic pump for the case of two reservoirs at different heights.

Keywords: Pumps; automatic spreadsheet; reservoirs; cargo loss.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	JUSTIFICATIVA	8
1.2	OBJETIVOS	8
1.2.1	Objetivo Geral.....	8
1.2.2	Objetivos Específicos.....	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS BOMBAS	10
2.1.1	Bombas de Deslocamento Positivo.....	10
2.1.2	Turbobombas.....	13
2.2	PROPRIEDADES DOS FLUIDOS.....	13
2.2.1	Peso Específico.....	13
2.2.2	Pressão de vapor.....	14
2.2.3	Viscosidade Cinemática	14
2.3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	15
2.4	CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS.....	16
2.5	ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES.....	17
2.5.1	Princípio de Mecânica dos Fluidos.....	17
2.5.2	Velocidade Recomendada	18
2.5.3	Número de Reynolds.....	18
2.5.4	Classificação do escoamento.....	19
2.5.5	Fator de Fricção	19
2.5.6	Válvulas	21
2.5.7	Comprimento Equivalente	22
2.5.8	Perda de Carga	23
2.6	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	24
2.6.1	Altura total de Sucção	24
2.6.2	Altura Total de Recalque	24
2.6.3	Determinação da curva do sistema	25
2.7	DETERMINAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO	26
2.8	CAVITAÇÃO	26
2.9	ENCANAMENTO DE RECALQUE ALIMENTANDO DOIS RESERVATÓRIOS	29
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	FUNCIONAMENTO DA PLANILHA.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	APLICAÇÃO PRÁTICA	33
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42
	APÊNDICE A – CRIAÇÃO DA PLANILHA	43
	APÊNDICE B – VALIDAÇÃO DA PLANILHA.....	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A captação e distribuição de água tem sido, desde a Antiguidade, uma das preocupações da humanidade. Dessa maneira, com o desenvolvimento das civilizações e o estabelecimento de centros populacionais distantes dos rios surgiu a necessidade de alternativas que permitissem captar, transportar e armazenar água. Além de atender as crescentes demanda de irrigação de terras para fins agrícolas. Nesse contexto, foram criadas as bombas - máquinas geratrizes - a fim de vencer essas adversidades, Claudino (2020).

Essas máquinas são aquelas que recebem trabalho mecânico, geralmente fornecido por uma máquina motriz, e o transforma em energia hidráulica, comunicando ao líquido um acréscimo de energia potencial e cinética. (BRASIL, 2010).

O progresso na tecnologia fez surgir uma grande variedade de modelos de bombas permitindo, assim, o uso em diversas aplicações, por exemplo, a construção de tipos próprios para esgotos sanitários e dragagem tanto de líquidos extremamente viscosos quanto de líquidos muito voláteis.

Partindo para o dimensionamento, devido a iteratividade dos processos e a grande quantidade das variáveis envolvidas é importante a utilização de recursos que automatizem a geração de resultados, garantindo assim, a fácil manipulação dos parâmetros para mensurar a tubulação e seleção da máquina corretamente com maior agilidade e mitigação dos possíveis erros humanos.

Ante o exposto, esse trabalho tem como fim criar uma planilha geral para dimensão e seleção de bomba hidráulica para o caso de dois reservatórios em alturas diferentes e utilizá-la para uma aplicação prática com o intuito de melhor apresentação e explicação da planilha.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo, em geral, a aplicação dos conceitos de mecânica dos fluidos, máquinas de fluxo e a criação de uma planilha geral que consiga dimensionar e selecionar bomba hidráulica para dois patamares, a partir de dados

referentes ao sistema de bombeamento e a requisitada operação, previamente fornecidos, serão calculados parâmetros fundamentais pela planilha citada.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Calcular o fator de fricção;
- Calcular o comprimento equivalente da tubulação (L_{eq}) incluindo as válvulas, registros e conexões que compõem uma instalação hidráulica;
- Determinar a velocidade da água no interior da tubulação;
- Determinar a perda de carga total de cada trecho da tubulação;
- Gerar o gráfico da altura manométrica da aplicação prática;
- Encontrar o ponto de funcionamento da bomba.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas inicialmente a classificação das bombas, depois uma breve descrição das propriedades da água e dos materiais, importantes para realização deste trabalho. Em seguida, serão expostos conceitos de curva característica da bomba e escoamento em tubulações, noções fundamentais de mecânica dos fluidos. Além disso, serão mostrados os cálculos necessários para o estudo não só de bombas, como também do seu respectivo sistema, sendo possível assim, obter as suas respectivas curvas, encontrar o ponto de operação e rendimento da bomba. Por fim, explicar o assunto de encanamento de recalque alimentando dois reservatórios.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS BOMBAS

Conforme Macintyre (1987, p. 38) as bombas são definidas como

Bombas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Sendo uma máquina geratriz, ela transforma o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicada ao líquido sob as formas de energia de pressão e cinética.

Além disso, existem diversos critérios de classificação de bombas, no entanto este trabalho será limitado apenas ao critério de acordo com a forma que a energia é cedida ao fluido, por ser aquele de aplicação mais difundida.

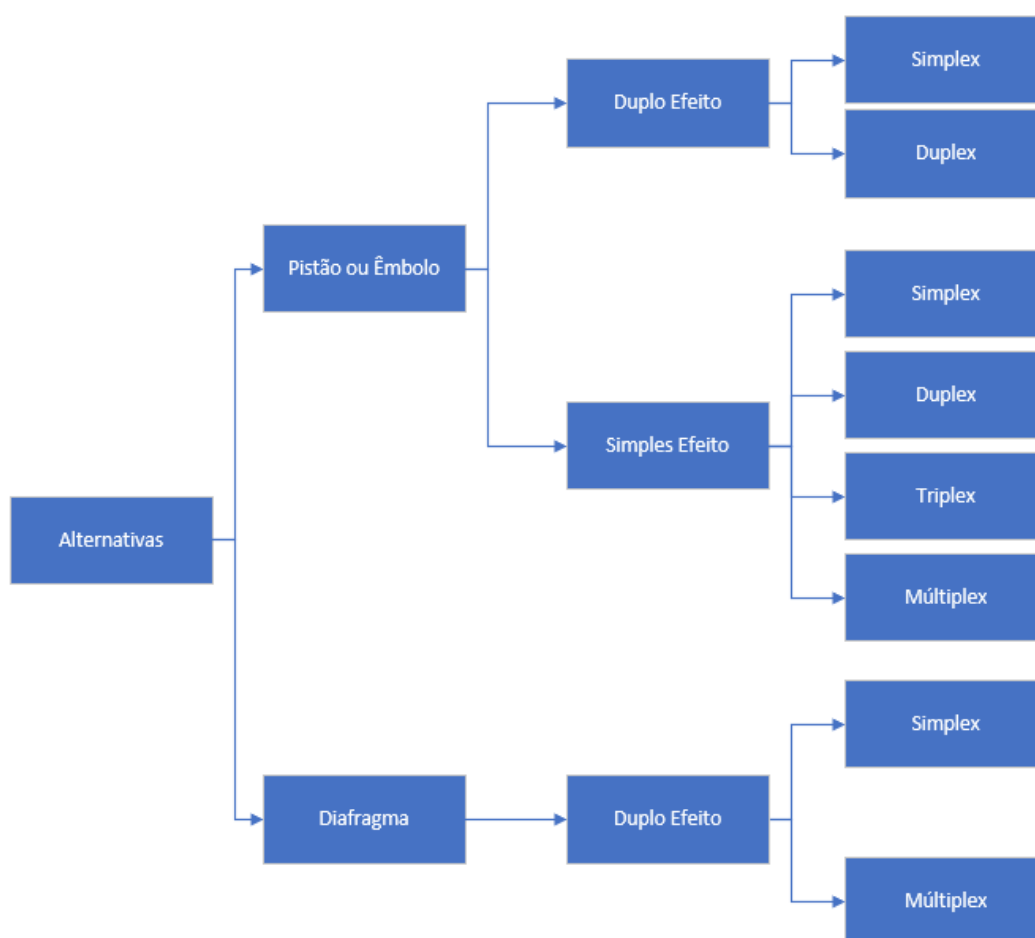
2.1.1 Bombas de Deslocamento Positivo

"A característica principal desta classe de bombas é que uma partícula líquida em contato com o elemento que comunica a energia tem aproximadamente a mesma trajetória que a do órgão com o qual está em contato." (MACINTYRE, 1987, p. 39).

As bombas de deslocamento positivo podem ser classificadas como alternativas ou rotativas.

Nas máquinas alternativas “o líquido recebe a ação das forças diretamente de um pistão ou êmbolo (pistão alongado) ou de uma membrana flexível (diafragma).” (MACINTYRE, 1987, p. 39). Além disso, a classificação dessas máquinas está demonstrada na figura 1.

Figura 1 – Classificação Bombas Alternativas



Fonte: Adaptado Macintyre (1987)

Sendo que as bombas de simples efeito são caracterizadas quando apenas uma face do êmbolo atua sobre o líquido já a de duplo efeito é definida quando as duas faces atuam do êmbolo atua sobre o líquido. Ademais, as denominações de bombas simplex, duplex, triplex e multiplex são de acordo com a quantidade de

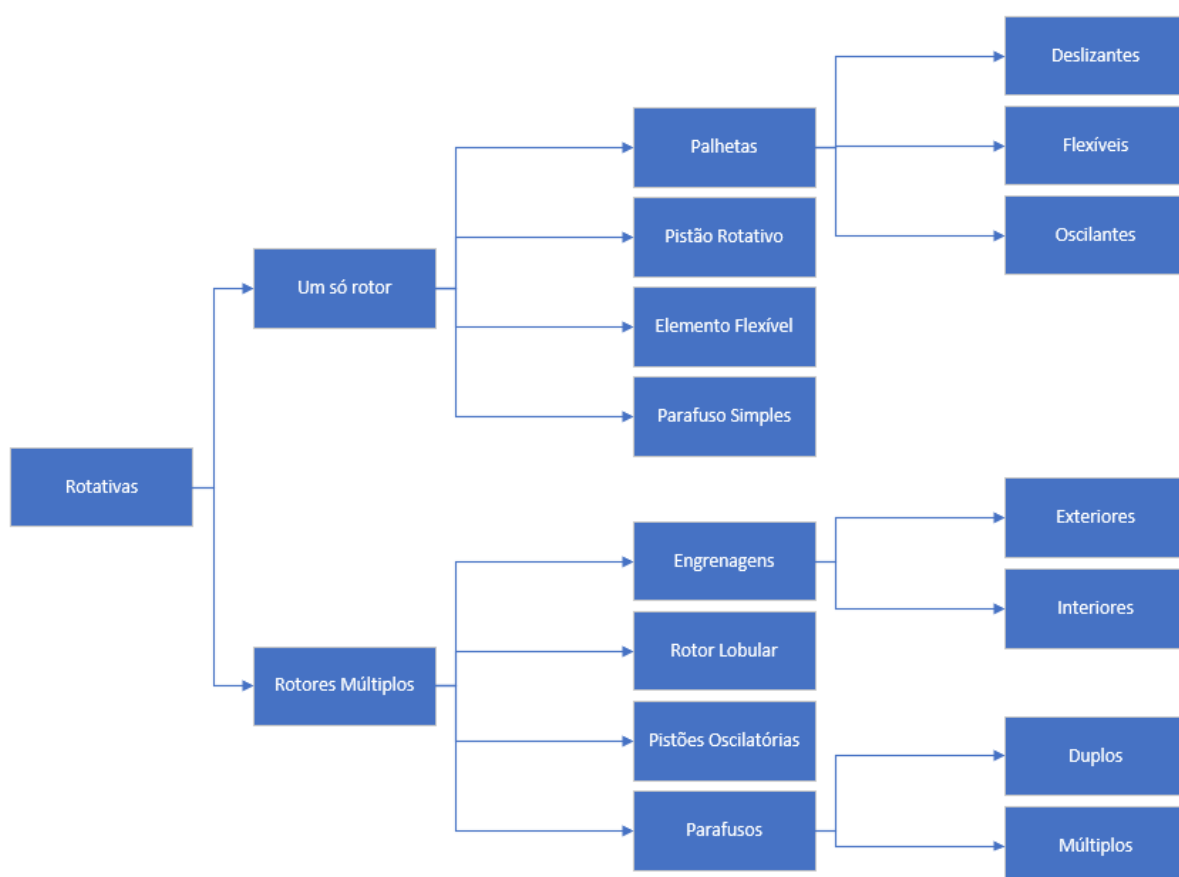
câmaras com pistão ou êmbolo, 1, 2, 3 ou mais de três, respectivamente. (MACINTYRE, 1987).

Já nas bombas rotativas (MACINTYRE, 1987, p. 41)

o líquido recebe a ação de forças proveniente de uma ou mais peças dotadas de movimento de rotação que, comunicando energia de pressão, provocam seu escoamento. A ação das forças se faz segundo a direção que é praticamente a do próprio movimento de escoamento do líquido. A descarga e a pressão do líquido bombeado sofrem pequenas variações quando a rotação é constante.

Além disso, a classificação dessas máquinas está demonstrada na figura 2.

Figura 2 – Classificação Bombas Rotativas



Fonte: Adaptado Macintyre (1987)

2.1.2 Turbobombas

As bombas rotodinâmicas se caracterizam por possuírem um órgão rotatório dotado de pás, denominado rotor, o qual exerce sobre o líquido forças que resultam da aceleração que lhe imprime. Essa aceleração não possui a mesma direção e o mesmo sentido do movimento do líquido em contato com as pás. (MACINTYRE, 1987).

Ademais, Macintyre (1987, p. 43) discorre sobre a necessidade de um difusor pois é

Onde é feita a transformação da maior parte da elevada energia cinética com que o líquido sai do rotor, em energia de pressão. Desse modo, ao atingir a boca de saída da bomba, o líquido é capaz de escoar com velocidade razoável, equilibrando a pressão que se opõe ao seu escoamento. Esta transformação é operada de acordo com o teorema de Bernoulli, pois o difusor sendo, em geral, de seção gradativamente crescente, realiza uma contínua e progressiva diminuição da velocidade do líquido que por ele escoar, com o simultâneo aumento da pressão, de modo a que esta tenha valor elevado e a velocidade seja reduzida na ligação da bomba ao encanamento do recalque.

2.2 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

2.2.1 Peso Específico

O peso específico de qualquer fluido é a força da gravidade exercida sobre sua massa específica. Essa propriedade pode ser calculada pela seguinte equação 1 (ÇENGEL, 2012).

$$\gamma = g \cdot \rho \quad (1)$$

Onde:

g – Aceleração da gravidade (m/s²);

ρ – Massa Específica (kg/m³).

2.2.2 Pressão de vapor

"A pressão de vapor de uma substância pura é definida como a pressão exercida por seu vapor em equilíbrio de fase com seu líquido numa dada temperatura é uma propriedade da substância pura e é idêntica à pressão de saturação do líquido." (ÇENGEL, 20012, p. 35).

Ademais, a razão da importância da pressão de vapor é a possibilidade da pressão do líquido nos sistemas de escoamento cair abaixo da pressão de vapor, resultando em vaporização não planejada. (Çengel, 2012).

2.2.3 Viscosidade Cinemática

A viscosidade dinâmica (μ) ou viscosidade absoluta é dada em termos da força requerida para mover uma unidade de área a uma unidade de distância, pode ser definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação ocorrida no fluido (ÇENGEL, 2012).

A viscosidade cinemática é a relação entre viscosidade dinâmica (μ) pela densidade (equação 2).

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

Onde:

μ – Viscosidade cinemática do fluido (Pa·s).

v – Viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Por fim, a figura 3 contém todas as propriedades da água citadas nesse tópico.

Figura 3 – Propriedades da água

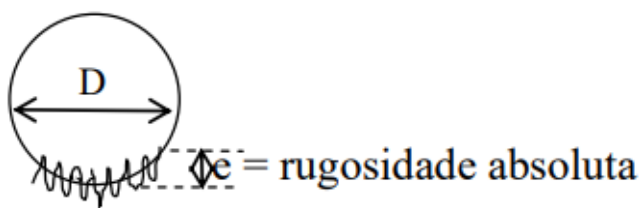
Temperatura, T (°C)	Massa Específica, ρ (kg/m ³)	Viscosidade Dinâmica, μ (N · s/m ²)	Viscosidade Cinemática, ν (m ² /s)	Tensão Superficial, σ (N/m)	Pressão de Vapor, p_v (kPa)	Módulo de Compres- sibilidade, E_r (GPa)
0	1000	1,76E-03	1,76E-06	0,0757	0,661	2,01
5	1000	1,51E-03	1,51E-06	0,0749	0,872	
10	1000	1,30E-03	1,30E-06	0,0742	1,23	
15	999	1,14E-03	1,14E-06	0,0735	1,71	
20	998	1,01E-03	1,01E-06	0,0727	2,34	
25	997	8,93E-04	8,96E-07	0,0720	3,17	2,21
30	996	8,00E-04	8,03E-07	0,0712	4,25	
35	994	7,21E-04	7,25E-07	0,0704	5,63	
40	992	6,53E-04	6,59E-07	0,0696	7,38	
45	990	5,95E-04	6,02E-07	0,0688	9,59	
50	988	5,46E-04	5,52E-07	0,0679	12,4	2,29
55	986	5,02E-04	5,09E-07	0,0671	15,8	
60	983	4,64E-04	4,72E-07	0,0662	19,9	
65	980	4,31E-04	4,40E-07	0,0654	25,0	
70	978	4,01E-04	4,10E-07	0,0645	31,2	
75	975	3,75E-04	3,85E-07	0,0636	38,6	2,12
80	972	3,52E-04	3,62E-07	0,0627	47,4	
85	969	3,31E-04	3,41E-07	0,0618	57,8	
90	965	3,12E-04	3,23E-07	0,0608	70,1	
95	962	2,95E-04	3,06E-07	0,0599	84,6	
100	958	2,79E-04	2,92E-07	0,0589	101	

Fonte: Fox (2010)

2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A tubulação apresenta asperezas nas paredes internas que influem na perda de carga dos fluidos em escoamento. Em geral, tais asperezas não são uniformes, mas apresentam uma distribuição aleatória tanto em altura como em disposição. Contudo, para efeito de estudo, supõe-se inicialmente que elas tenham altura e distribuição uniformes. Essa altura é denominada rugosidade absoluta, figura 4 (PORTO, 2006).

Figura 4 – Rugosidade absoluta



Fonte: Porto (2006)

Além disso, a rugosidade das paredes, dependerá do processo de fabricação, do envelhecimento do tubo, do desgaste pelo uso, do tipo de material, entre outros. A relação da rugosidade absoluta (e) com o diâmetro da tubulação (D) é denominada rugosidade relativa (e/D), conforme Porto, 2006.

A figura 5 contém os valores das rugosidades absolutas de alguns materiais em milímetros.

Figura 5 – Rugosidade absoluta equivalente (mm)

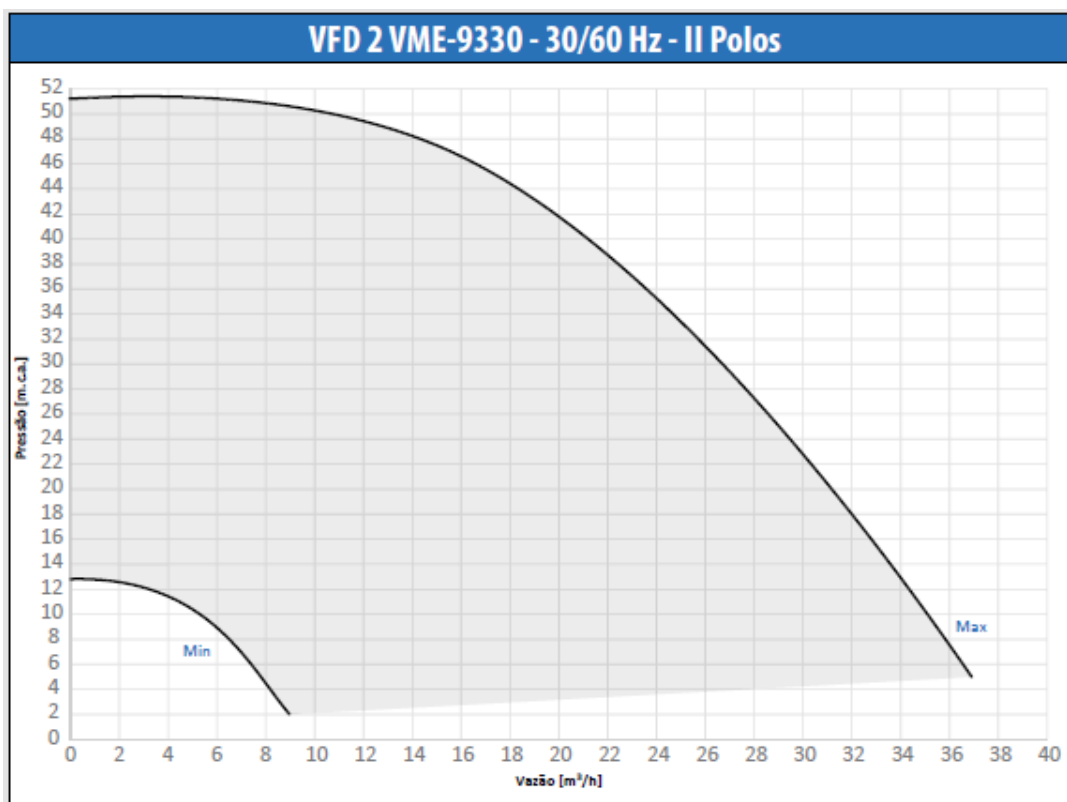
Material	Rugosidade equivalente (mm)		
Aço, revestimento asfalto quente	0,3	a	0,9
Aço, revestimento esmalte centrifugado	0,01	a	0,06
Aço enferrujado ligeiramente	0,15	a	0,3
Aço enferrujado	0,4	a	0,6
Aço muito enferrujado	0,9	a	2,4
Ferro galvanizado novo, com costura	0,15	a	0,2
Ferro galvanizado novo, sem costura	0,06	a	0,15
Ferro fundido revest. asfalto	0,12	a	0,20
Ferro fundido com crostas	1,5	a	3,0
PVC e Cobre	0,015		
Cimento-amianto, novo	0,05	a	0,10

Fonte: Porto (2006)

2.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS

As curvas características das bombas são experimentações realizadas pelo fabricante da bomba e transcritas em seu manual técnico, por intermédio de gráficos. A curva (figura 6) representa a variação da carga fornecida pela bomba com a variação da vazão. A carga pode ser definida como a energia por unidade peso que a bomba tem condições de fornecer ao fluido para uma determinada vazão, de acordo com Lopes, 2007.

Figura 6 – Curva Característica de uma Bomba Schneider



Fonte: Tabela de seleção de bombas e motobombas Schneider (2019)

2.5 ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES

A fim da bomba ser eficiente, ter um desempenho eficaz e, assim, ter um menor consumo de energia, é imprescindível calcular precisamente a altura total do sistema hidráulico para uma determinada vazão (LIMA, 2003).

2.5.1 Princípio de Mecânica dos Fluidos

Consoante Çengel (2012), qualquer método para o dimensionamento da tubulação, baseia-se na Equação da Continuidade (equação 3).

$$Q = A \cdot V \quad (3)$$

Onde:

Q – Vazão (m^3/s);

V – Velocidade do fluido (m/s);

A – Área (m²).

2.5.2 Velocidade Recomendada

Os limites de velocidade da água (figura 7) são determinados por considerações de custo das tubulações e ruídos (NBR 16401 – 1, 2008).

Figura 7 – Velocidades Econômicas Recomendadas

Aplicação	Velocidade m/s
Recalque de bombas	2,4 a 3,6
Sucção de bombas	1,2 a 2,1
Geral	1,5 a 3,5

Fonte: NBR 16401 – 1 (2008)

2.5.3 Número de Reynolds

Osborne Reynolds, após experimentos, descobriu que o regime de fluxo depende, principalmente, da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido, de acordo com Fox (2010). Essa relação é conhecida como número de Reynolds (equação 4).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4)$$

Onde:

Re – Número de Reynolds;

D – Diâmetro da tubulação (m);

ν – Viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

2.5.4 Classificação do escoamento

Çengel (2012, p. 10) discorre sobre a diferença entre o escoamento laminar e turbulento que

O movimento altamente ordenado dos fluidos caracterizado por camadas suaves do fluido é denominado laminar. A palavra laminar origina-se do movimento de partículas adjacentes do fluido agrupadas em “lâminas”. O escoamento dos fluidos de alta viscosidade como os óleos com baixas velocidades é tipicamente laminar. O movimento altamente desordenado dos fluidos que ocorre em velocidades altas e é caracterizado por flutuações é chamado de turbulento. O escoamento de fluidos de baixa viscosidade como o ar em altas velocidades é tipicamente turbulento. O regime do escoamento tem grande influência sobre a potência requerida para bombeamento. Um escoamento que se alterna entre laminar e turbulento é chamado de transitório.

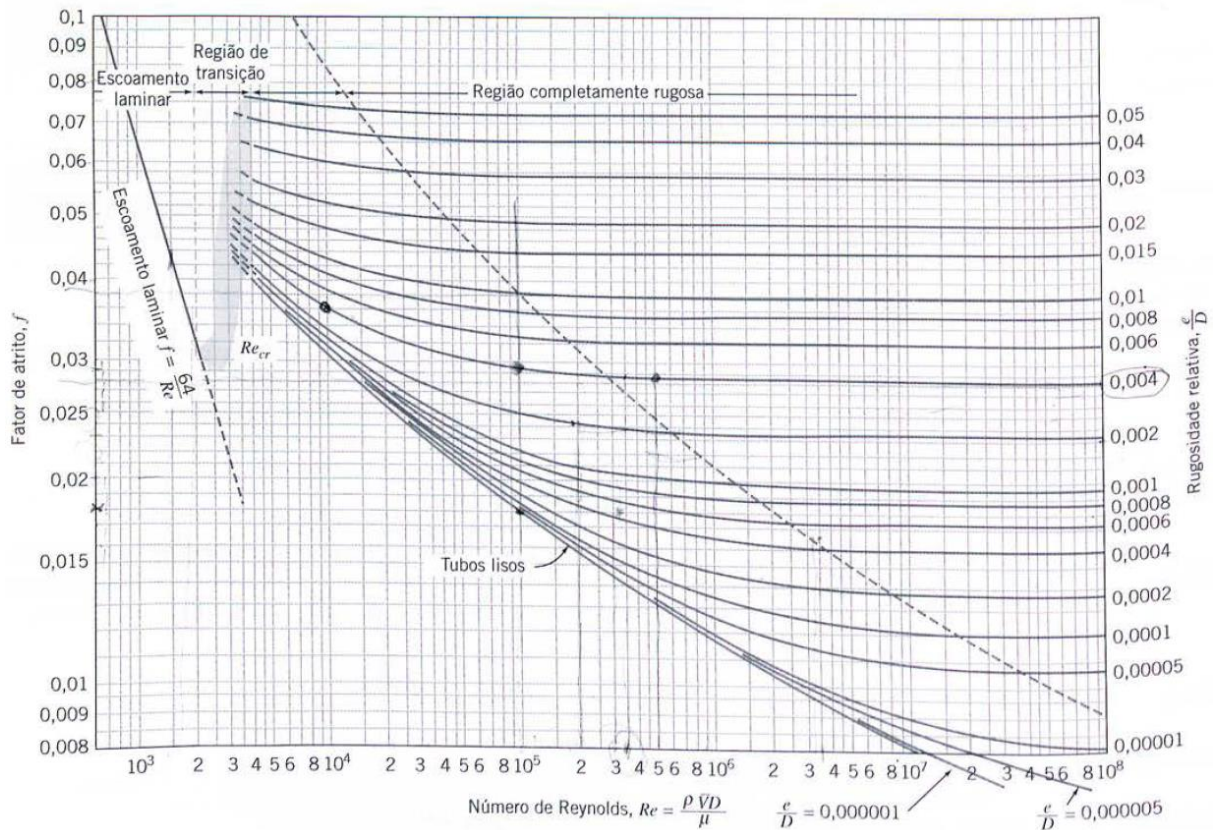
Na maioria das condições práticas, o escoamento de um tubo é laminar para número de Reynolds menor ou igual a 2300, turbulento igual ou maior que 4000 e escoamento de transição entre esses valores. (Çengel, 2012).

2.5.5 Fator de Fricção

O fator de fricção é determinado experimentalmente e é obtido através do diagrama de Moody (figura 8) para escoamento turbulento, já que o escoamento laminar é independente da rugosidade, como demonstrado na equação 5 (FOX, 2010).

$$f_{\text{laminar}} = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

Figura 8 – Diagrama de Moody



Fonte: Fox (2010)

Para escoamentos turbulentos a fim de evitar uso de gráficos para obtenção desse fator, métodos foram criados para calcular essa variável, a mais usual é a de Colebrook (equação 6).

$$\frac{1}{\sqrt{f_{turbulento}}} = -2 \log \cdot \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f_{turbulento}}} \right) \quad (6)$$

Uma alternativa é utilizar a equação de Haaland (equação 7) que fornece resultados com que diferem cerca de 2% em relação à anterior, conforme Fox (2010).

$$\frac{1}{\sqrt{f_{turbulento}}} = -1,8 \log \cdot \left[\left(\frac{e/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (7)$$

2.5.6 Válvulas

“Válvulas são dispositivos destinados a estabelecer, controlar e interromper a descarga de fluidos nos encanamentos.” (MACINTYRE, 1987, p. 597).

Entre as várias formas de classificar as válvulas, sobressai a que se baseia na natureza do acionamento, como acionamento manualmente, comandado por motores e acionado pelas forças provenientes da ação do próprio líquido em escoamento. (MACINTYRE, 1987).

2.6.6.1 Válvula de gaveta

Na válvula de gaveta a perda de carga, quando completamente abertas, é insignificante, mas quando parcialmente abertas, produzem perda de carga elevada. (MACINTYRE, 1987).

Além disso, Macintyre (1987, p. 598) disserta sobre particularidades sobre a válvula de gaveta

Embora não sejam aconselháveis de um modo geral para regulagem, todavia, quando se pretende reduzir a descarga, alterando o ponto de funcionamento da bomba, são utilizados de modo a criarem a perda de carga necessária para conseguir o objetivo almejado. Esse motivo e o custo relativamente reduzido explicam seu largo emprego nas instalações de bombeamento de pequeno e médio portes.

Para certas aplicações o uso dessas válvulas é inconveniente, pois em alguns tipos menos aperfeiçoados, sua estanqueidade não é perfeita, porém, para o caso comum das instalações de bombeamento, não é essencial. Ademais, são as válvulas mais empregadas para líquidos. (MACINTYRE, 1987).

2.6.6.2 Válvulas de esfera

De acordo com Macintyre (1987, p. 604) as válvulas de esfera

São válvulas de uso geral, de fechamento rápido, muito usadas para ar comprimido, vácuo, vapor, gases e líquidos. Nas instalações de bombeamento são empregadas em serviços auxiliares, mas não são ligadas aos encanamentos da bomba como válvulas de bloqueio. O controle do fluxo se faz por meio de uma esfera, possuindo uma passagem central e localizada no corpo da válvula. O comando é, em geral, manual, com o auxílio de uma alavanca. Essas válvulas não se aplicam a casos em que se pretende variar a descarga, mas apenas abrir ou fechar totalmente a passagem do fluido.

2.6.6.3 Válvulas de regulação

As válvulas de regulação têm um controle eficiente do escoamento, graças ao “estrangulamento” que provocam, também possibilitam o bloqueio total do líquido. (MACINTYRE, 1987).

O tipo mais comum da válvula de regulação são as de globo. Essas válvulas segundo Macintyre (1987, p. 608) “servem para regulação da descarga, pois podem trabalhar com o tampão da vedação do orifício em qualquer posição, embora acarretem fortes perdas de carga, mesmo com abertura máxima.”

Além do mais, elas possuem fechamentos mais rápidos que os de gaveta e são usadas quando o problema da perda de carga for irrelevante diante da necessidade de uma absoluta estanqueidade. (MACINTYRE, 1987).

2.6.6.4 Válvulas de retenção

As válvulas de retenção ou válvulas que permitem o escoamento em um só sentido conforme Macintyre (1987, p. 618) “fecham automaticamente por diferença de pressão provocadas pelo próprio escoamento do líquido, quando há tendência à inversão no seu sentido de escoamento.”

2.5.7 Comprimento Equivalente

A tubulação sempre terá válvulas, cotovelos, registros que se transformam em barreiras ainda maiores para a circulação do fluido, singularidades.

A representação da perda de carga de um acessório é o comprimento equivalente que é obtido em tabelas (figura 9) em função do tipo de acessório, diâmetro e material da tubulação, de acordo com Lopes (2007).

Figura 9 – Perdas locais de singularidades

DIÂMETROS DA TUBULAÇÃO (MM)	13	19	25	32	38	50	63	75	100	125	150	200	250	300	350
COTOVELO 90° RAIOS LONGO	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7	3,4	4,3	5,5	6,1	7,3
COTOVELO 90° RAIOS MÉDIO	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	2,1	2,8	3,7	4,3	5,5	6,7	7,9	9,5
COTOVELO 90° RAIOS CURTO	0,5	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2	2,5	3,4	4,2	4,9	6,4	7,9	9,5	10,5
COTOVELO 45°	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,3	1,9	2,3	3	3,8	4,6	5,3
CURVA 90° R/D - 1 1/2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,3	1,6	1,9	2,4	3	3,6	4,4
CURVA 90° R/D - 1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1	1,3	1,6	2,1	2,5	3,3	4,1	4,8	5,4
CURVA 45°	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	2,5
ENTRADA NORMAL	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,6	2	2,5	3,5	4,5	5,5	6,2
ENTRADA DE BORDA	0,4	0,5	0,7	0,9	1	1,5	1,9	2,2	3,2	4	5	6	7,5	9	11
REGISTRO DE GAVETA ABERTO	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	2,1	2,4
REGISTRO DE GLOBO ABERTO	4,9	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21	26	34	43	51	67	85	102	120
REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	2,6	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10	13	17	21	26	34	43	51	60
TÊ PASSAGEM DIRETA	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7	3,4	4,3	5,5	6,1	7,3
TÊ SAÍDA DE LADO	1	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4	10	13	16	19	22
TÊ SAÍDA BILATERAL	1	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4	10	13	16	19	22
VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	3,6	5,6	7,3	10	11,6	14	17	20	23	30	39	52	65	78	90
SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	0,4	0,5	0,7	0,9	1	1,5	1,9	2,2	3,2	4	5	6	7,5	9	11
VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	1,1	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	6,4	10,4	12,5	16	20	24	28
VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO	1,6	2,4	3,2	4	4,8	6,4	8,1	9,7	12,9	16,1	19,3	25	32	38	45

Fonte: Adaptado Macintyre (1987)

2.5.8 Perda de Carga

Segundo Ashrae (2017), a perda de carga representa a energia cedida pelo fluido devido ao atrito e a perturbações no escoamento. Esse fator pode ser calculado pela fórmula de Darcy-Weisbach (equação 8).

$$hf = \frac{f \cdot (L + Leq) \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (8)$$

Onde:

h_f - Perda de Carga (m);

L – Comprimento linear (m);

L_{eq} – Comprimento equivalente (m).

2.6 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

2.6.1 Altura total de Sucção

A altura total de sucção (equação 9) representa a energia que o líquido deve receber para que, partindo do reservatório inferior, atinja a entrada da bomba, vencendo a altura estática, a perda de carga e adquira a energia cinética necessária (MACINTYRE, 1987).

$$H_s = h_s + \frac{V_o^2}{2 * g} + h_{fs} \quad (9)$$

Sendo:

h_s – Altura Estática de sucção;

h_{fs} – Perda de Carga na tubulação de sucção.

2.6.2 Altura Total de Recalque

A altura total de descarga (equação 10) é a energia que a bomba deve fornecer ao líquido para que este, partindo da saída da bomba, atinja a tubulação de recalque ou a superfície livre no reservatório superior, vencendo a altura estática de recalque e a perda de carga na tubulação de recalque. (MACINTYRE, 1987).

$$H_r = h_r + h_{fr} \quad (10)$$

Sendo:

h_r – Altura Estática de recalque;

h_{fr} – Perda de Carga na tubulação de recalque.

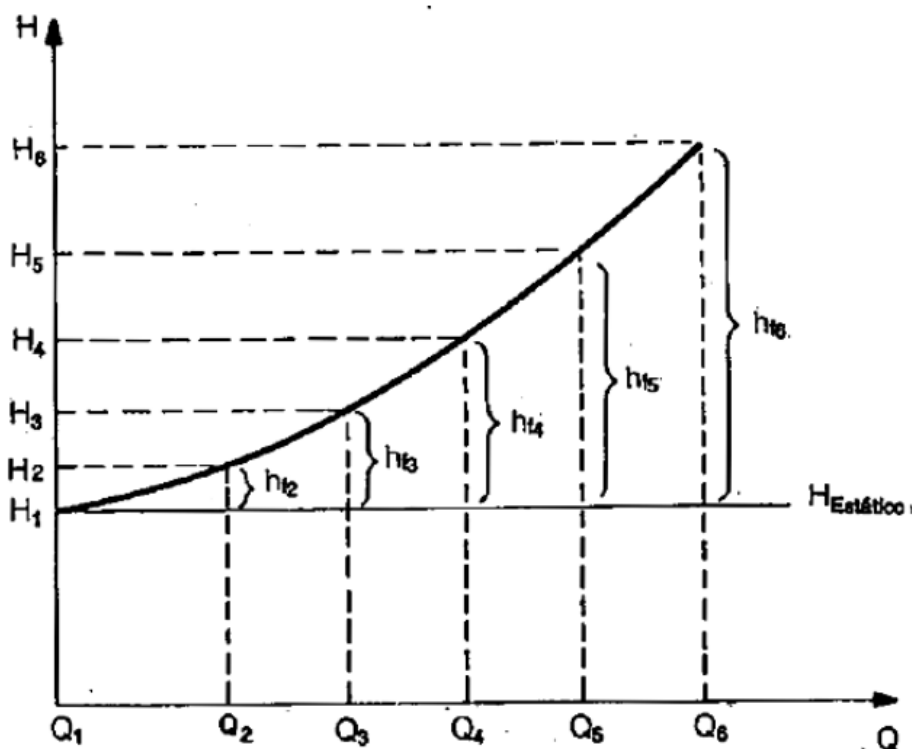
2.6.3 Determinação da curva do sistema

A curva do sistema mostra a variação da altura manométrica total (equação 11) com a vazão.

$$H = h_r + h_s + \frac{v_o}{2 \cdot g} + h_{fs} + h_{fr} \quad (11)$$

Para obter essa curva, arbitram-se seis valores de vazão, por exemplo, sendo um deles de vazão nula e outro referente à vazão de operação desejada. Das outras quatro vazões, duas são acima da vazão de operação projetada e duas abaixo. Dessa forma, busca-se cobrir uma faixa ampla de vazões, como demonstrado na Figura 10 (GOMES, 2013).

Figura 10 – Perdas locais de singularidades

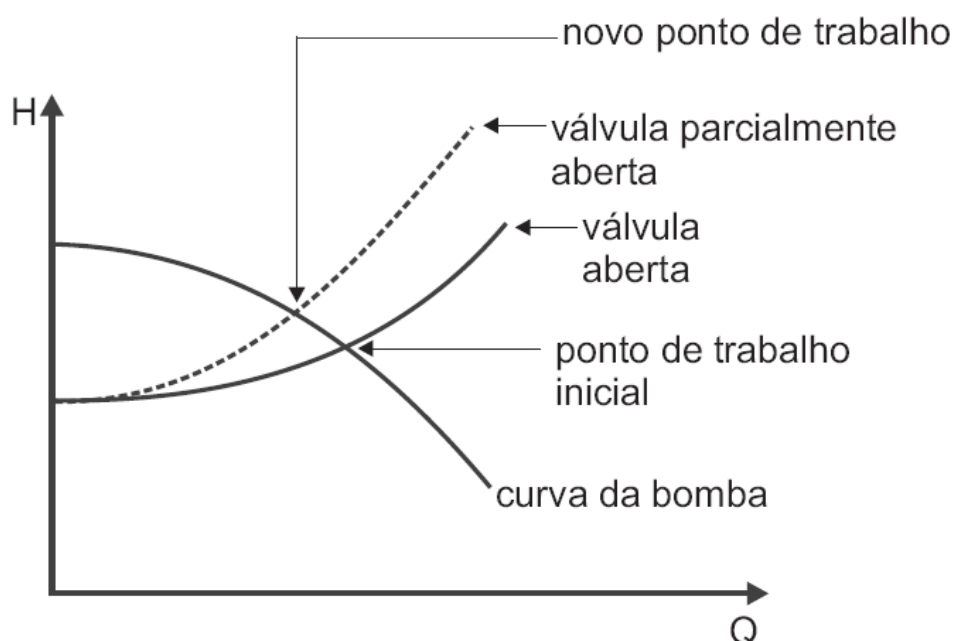


Fonte: De Matos (1998)

2.7 DETERMINAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO

Para determinar o ponto de operação da bomba, deve-se verificar o ponto de intersecção entre a curva do sistema e a curva característica da bomba. A partir desse ponto é descoberta a vazão de operação, possibilitando assim, obter a potência e o rendimento da bomba (SOARES, 2013). A figura 11 ilustra o que foi descrito.

Figura 11 – Ponto de operação da bomba



Fonte: Soares (2013)

2.8 CAVITAÇÃO

No deslocamento de superfícies constituídas por pás, como sucede nas turbo máquinas, ocorrem inevitavelmente rarefações no líquido. Assim, se a pressão absoluta diminuir até atingir a pressão de vapor do líquido na temperatura e, que se encontra, inicia-se um processo de vaporização do fluido, dando início ao processo de cavitação. (MACINTYRE, 1987).

Esse processo segundo Macintyre (1987, p. 206) se inicia

nas regiões mais rarefeitas, formam-se pequenas bolsas, bolhas ou cavidades no interior das quais o líquido se vaporiza. Em seguida, conduzidas pela corrente líquida provocada pelo movimento do órgão propulsor e com

grande velocidade, atingem regiões de elevada pressão, onde se processa seu colapso, com a condensação do vapor e o retorno ao estado líquido. As bolhas que contêm vapor do líquido parecem originar-se em pequenas cavidades nas paredes do material ou em torno de pequenas impurezas contidas no líquido, em geral próximas as superfícies chamadas “núcleos de vaporização” ou “de cavitação”.

As principais consequências da cavitação são a corrosão do rotor (desgastar, remover partículas e destruir pedaços dos rotores e dos tubos de aspiração junto a entrada da bomba), diminuição drástica do rendimento, ruídos, trepidação e vibração da máquina, representa uma grande parte dos problemas nas instalações hidráulicas. (MACINTYRE, 1987).

Diante dos fatos, após a seleção do equipamento, é obrigatório, verificar o risco de cavitatar ou não. Dessa maneira, a validação é realizada por meio do cálculo do NPSH disponível e comparação com o NPSH requerido (normalmente disponibilizado no catálogo), em que o NPSH disponível, deve ser maior que o NPSH requerido, mesmo que, teoricamente, a igualdade entre os dois termos citados não é considerada cavitação (LOPES, 2007).

Contudo, segundo NBR 16401-1 (2008), em qualquer condição operacional, deve-se manter uma pressão estática líquida positiva na conexão de aspiração da bomba 20% superior à mínima requerida pela bomba para evitar a cavitação.

A equação do NPSH disponível que conforme Macintyre (1987, p. 209) representa a “disponibilidade de energia com que o líquido penetra na boca de entrada da bomba e que a ele permitirá atingir o bordo da pá do rotor”, está representada na equação 12.

Já o NPSH requerido, quando não disponibilizado no catálogo, necessita-se calcular o fator de cavitação ou fator de cavitação de Thoma (equação 13), a fim de estimar o valor da pressão mínima exigida na entrada da bomba (equação 14).

$$NPSH_{disponível} = \frac{Vo^2}{2 \cdot g} + \frac{po}{\gamma} - hv \quad (12)$$

$$\sigma = \beta \cdot \left(n \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (13)$$

$$NPSH_{requerido} = \sigma \cdot H \quad (14)$$

Onde:

β – Fator dependente do tipo de bomba;

n – Rotação do rotor;

V_o – Velocidade inicial do fluido (m/s);

$\frac{p_o}{\gamma}$ – Pressão absoluta na entrada da bomba (m/s);

h_v – Pressão de vapor do fluido.

O fator β é variável de acordo com o tipo de bomba, como apresentado na tabela 1. (MACINTYRE, 1987).

Tabela 1 – Fator β

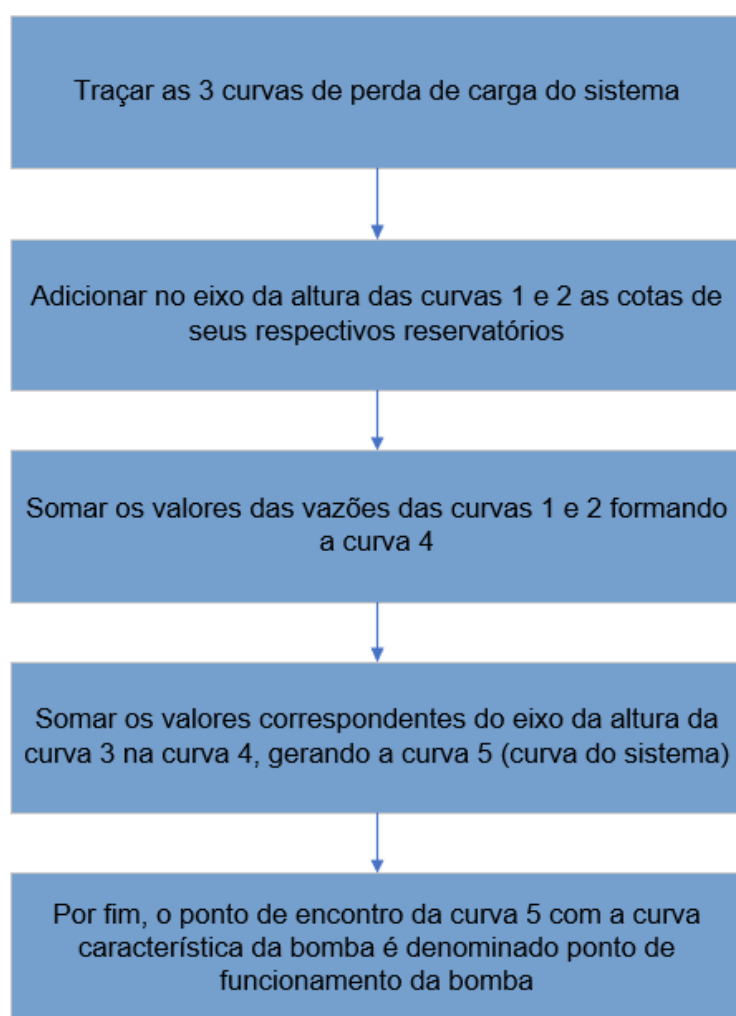
β	Tipo de Bomba
0,0011	Centrífugas radiais, lentas e normais
0,0013	Helicoidais e hélico-axiais
0,00145	Axiais

Fonte: Macintyre (1987)

2.9 ENCANAMENTO DE RECALQUE ALIMENTANDO DOIS RESERVATÓRIOS

Com o intuito de encontrar o ponto de operação em casos que uma mesma bomba recalque para dois reservatórios em alturas e distâncias diferentes é necessário seguir as 5 etapas expressas na figura 12, conforme Macintyre (1987).

Figura 12 - Passo a passo para determinar o ponto de funcionamento da bomba



Fonte: Adaptado Macintyre (1987)

O passo a passo mostrado na figura 12 considera os trechos “1”, “2”, e “3”, respectivamente, da bifurcação até o reservatório mais elevado; da bifurcação até o reservatório menos elevado; da bomba até a bifurcação.

3 METODOLOGIA

A metodologia foi elaborada de forma a melhor atender as exigências deste estudo. A princípio, realizou-se a revisão bibliográfica, na qual foram utilizados livros base sobre bombas, instalações hidráulicas e mecânica dos fluidos. Em seguida, elaborou-se então uma planilha para calcular os itens necessários para a seleção de uma bomba hidráulica para dois reservatórios em patamares diferentes.

3.1 FUNCIONAMENTO DA PLANILHA

Para o desenvolvimento da planilha, foram levados em conta itens relevantes e importantes para a seleção do equipamento. A planilha foi criada usando o programa Microsoft Excel, presente no pacote de programas do Microsoft Office.

A planilha é dividida em 5 setores: “Variáveis de Entrada”, “Perda de Carga”, “NPSH”, “Base de Dados”. A figura 13 mostra os setores da planilha e um breve resumo de cada.

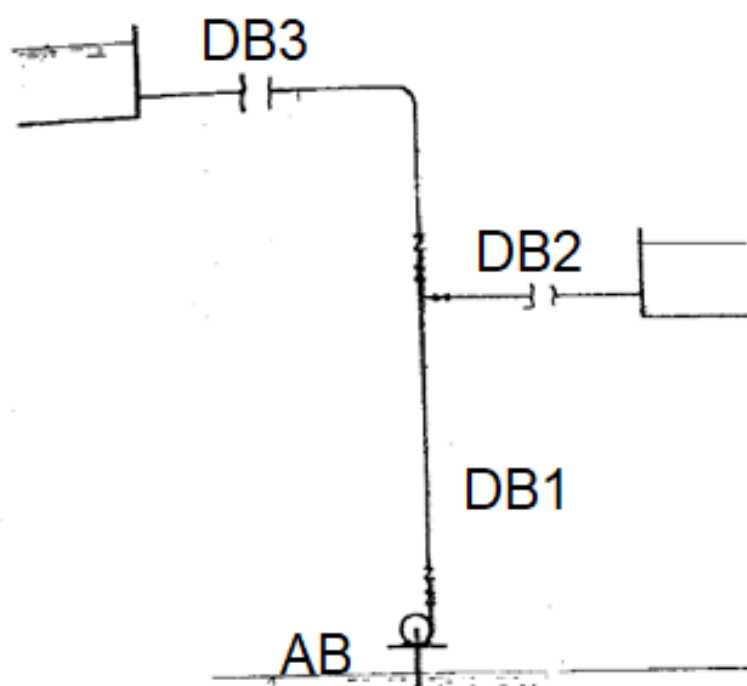
Figura 13 – Setores da Planilha

SETORES DA PLANILHA				
	VARIÁVEIS DE ENTRADA	PERDA DE CARGA	FUNCIONAMENTO DA BOMBA	NPSH
FUNCIONAMENTO DA PLANILHA	INSERIR DADOS DE ENTRADA DO ESTUDO DE CASO INSERIR SINGULARIDADES E SUAS RESPECTIVAS POSIÇÕES E DIÂMETROS	CALCULAR PERDA DE CARGA TOTAL (LINEAR E LOCAL) DE CADA TRECHO DA TUBULAÇÃO	INSERIR DADOS SOBRE A BOMBA (CURVA CARACTERÍSTICA) ANALISADA OBTEN A INTERSECÇÃO DA CURVA DO SISTEMA COM A CURVA DA BOMBA, OBTENDO ASSIM, O PONTO DE FUNCIONAMENTO	DETERMINAR O TIPO DE BOMBA CALCULAR $NPSH_{disponível}$ E $NPSH_{requerido}$ E COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO
				BASE DOS COMPRIMENTO EQUIVALENTE BASE DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA BASE DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Fonte: Autoria Própria

Ademais, a figura 14 apresenta uma tubulação de recalque alimentando dois reservatórios em alturas diferentes. Assim, a planilha construída reconhece os trechos da tubulação como mostra essa figura, ou seja, considera os trechos “AB”, “DB1”, “DB2”, e “DB3”, respectivamente, como o antes da bomba; da bomba até a bifurcação; da bifurcação até o reservatório menos elevado; da bifurcação até o reservatório mais elevado.

Figura 14 – Imagem de uma bomba para reservatórios em alturas diferentes



Fonte: Adaptado Macintyre (1987)

O setor “Variáveis de Entrada” é dividido em duas páginas, na primeira o usuário deve adicionar as variáveis de entrada comprimento linear da tubulação, altura final de cada trecho, diâmetro de cada trecho, temperatura do fluido e material do tubo dos trechos “AB”, “DB1”, “DB2” e “DB3”, como mostra a figura 29 no Apêndice A.

Já na segunda página do setor “Variáveis de Entrada” o usuário deve inserir os diâmetros, código de conexão, quantidade e a posição de cada singularidade, do caso em estudo com o intuito de descobrir o comprimento equivalente de cada trecho, a figura 30 no Apêndice A mostra a interface dessa página. Os códigos de conexão e diâmetros disponíveis das singularidades estão indicados no Apêndice A.

Após ter todos os dados e ter ciência sobre a vazão requerida para cada reservatório é possível pré-selecionar uma bomba para encontrar o ponto de operação, a fim de verificar se atende aos requisitos iniciais.

Na seção “Perda de Carga” os dados da curva da bomba serão utilizados como pontos para o cálculo do número de Reynolds, fator de atrito, velocidade e perda de carga dos trechos da aplicação prática, a montagem na planilha desse setor e as equações empregadas estão explicadas no Apêndice A.

No setor “Funcionamento da Bomba” as curvas das perdas de cargas de cada trecho da aplicação prática e do ponto de funcionamento da bomba (determinado de acordo com a figura 12) estarão plotados com suas respectivas equações

No setor “NPSH” (figura 35) é calculado o NPSH disponível e NPSH requerido (caso não haja no catálogo do fabricante do equipamento) a fim de verificar se ocorrerá cavitação, assim, para isso não acontecer o NPSH disponível deve ser maior que o NPSH requerido com o fator de segurança estipulado pela norma 16401-1, para isso é imprescindível inserir os dados da rotação da bomba e o tipo de bomba, dado que a vazão e altura já foram inseridos no setor anterior, a montagem na planilha desse setor e as equações empregadas estão explicadas no Apêndice A.

A última seção é a Base de Dados na qual foram inseridos na planilha os dados das imagens 3, 5 e 9.

Por último, o Apêndice B expõe a validação da planilha.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito da melhor explicação de como operar a planilha, será utilizado uma aplicação prática com os requisitos primordiais abordados nesse trabalho.

4.1 APLICAÇÃO PRÁTICA

A soja é, no Brasil, um dos principais itens da produção agrícola, sendo o segundo maior produtor mundial e o maior exportador mundial. Além disso, muitas famílias brasileiras, de diversas classes econômicas, dependem dos empregos gerados pelo complexo de produção, transporte e industrialização da soja (FARIAS, 2007).

Em um cultivo desse grão em uma fazenda no Brasil é essencial solucionar a irrigação dessa plantação, em que existe a necessidade de abastecer dois reservatórios (o mais elevado precisa de uma vazão 40 m³/h e o outro de 80 m³/h) em alturas diferentes a fim de suprir os requisitos necessários.

As figuras 15, 16 e 17 exibem respectivamente variáveis de entrada do estudo analisado; os diâmetros, código de conexão, quantidade, a posição e os comprimentos equivalentes de cada singularidade; informa a disposição do sistema, imagem meramente ilustrativa.

Figura 15 – Dados de entrada da aplicação prática

	INPUTS				
	Comprimento Linear (m)	Altura final (m)	Diâmetro (mm)	Temperatura do fluido (°C)	Material do Tubo
AB	10	0	125	30	PVC
DB1	10	10	125	30	PVC
DB2	120	10	100	30	PVC
DB3	80	15	100	30	PVC

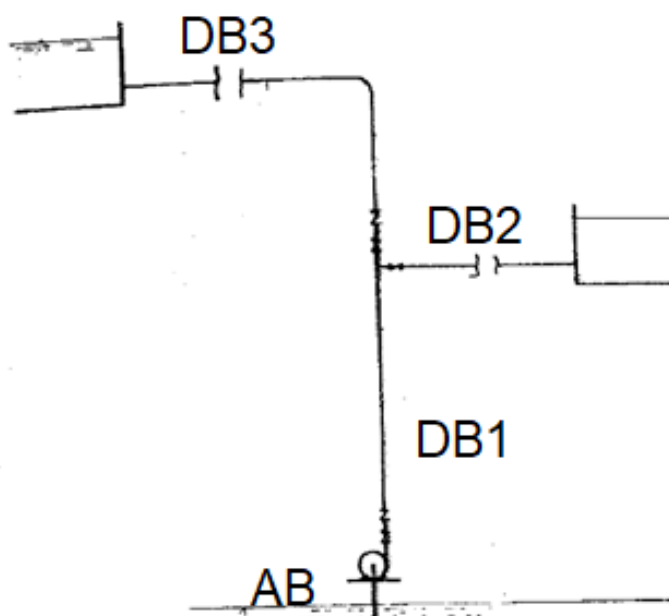
Fonte: Autoria Própria

Figura 16 – Dados de entrada da aplicação prática

INTERFACE DE CÁLCULO								
Diâmetro(mm)	CÓDIGO CONEXÃO	QUANTIDADE	Leq	POSIÇÃO	LeqAB	LeqDB1	LeqDB2	LeqDB3
125	1	1	2,7	AB	2,7	0	0	0
125	16	1	30	AB	30	0	0	0
125	8	1	2	AB	2	0	0	0
125	11	1	43	DB1	0	43	0	0
125	19	1	16,1	DB1	0	16,1	0	0
125	15	1	8,4	DB1	0	8,4	0	0
100	11	1	34	DB2	0	0	34	0
100	19	1	12,9	DB2	0	0	12,9	0
100	14	1	6,7	DB2	0	0	6,7	0
100	17	1	3,2	DB2	0	0	3,2	0
100	17	1	3,2	DB3	0	0	0	3,2
100	1	1	2,1	DB3	0	0	0	2,1
100	13	1	2,1	DB3	0	0	0	2,1
100	11	1	34	DB3	0	0	0	34
100	19	1	12,9	DB3	0	0	0	12,9
			0		0	0	0	0
TOTAL:			213,3	TOTAL:	34,7	67,5	56,8	54,3

Fonte: Autoria Própria

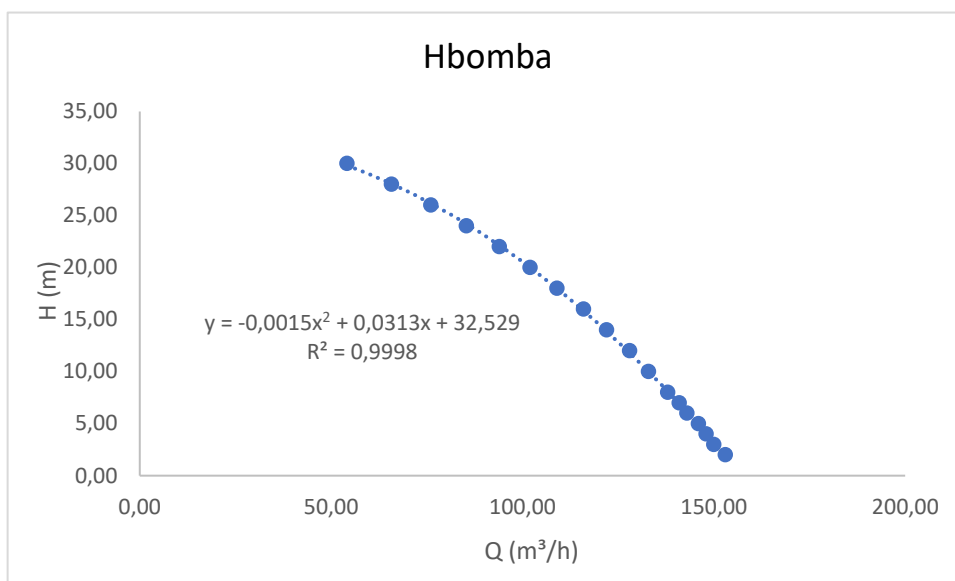
Figura 17 – Imagem de uma bomba para reservatórios em alturas diferentes



Fonte: Adaptado Macintyre (1987)

As bombas utilizadas serão do catálogo Schneider, 2019. A bomba pré-selecionada é a motobomba centrífuga moo estágio, rotor semiaberto, modelo MSA-21 R/F 2 1/2, com uma potência de 15 CV e Motor WEG IP-55, 2 polos, 60 Hz. A figura 18 mostra a curva do equipamento citado.

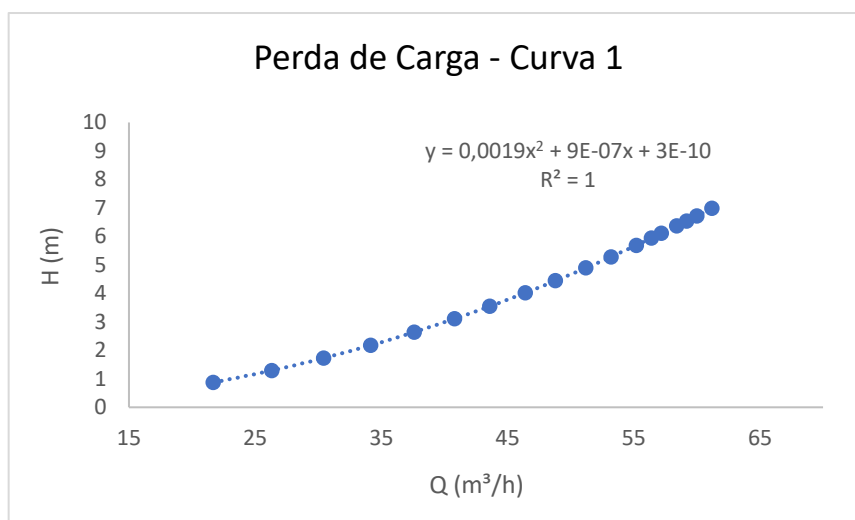
Figura 18 – Curva da bomba MSA-21 R/F 2 1/2, com 15 CV de potência



Fonte: Autoria Própria

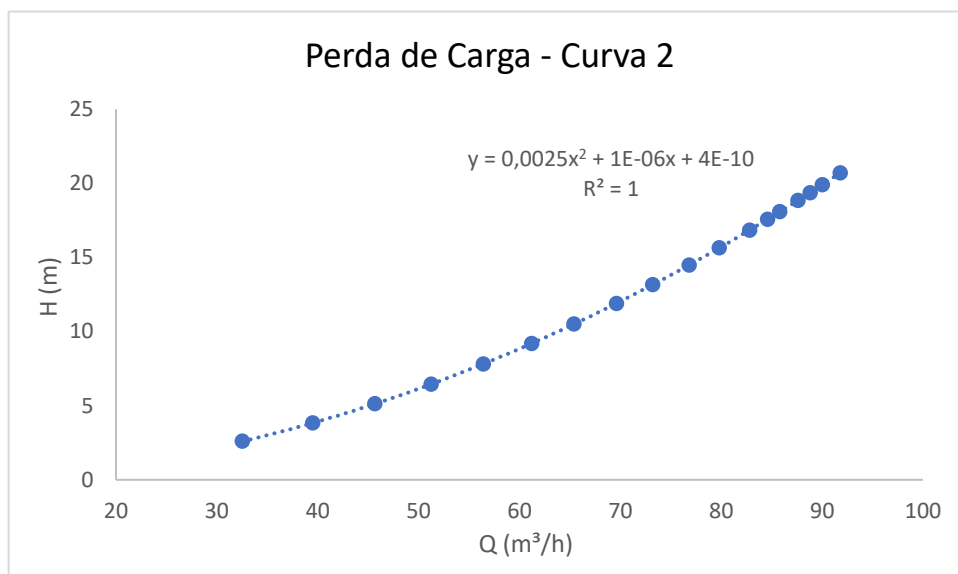
As figuras 19, 20 e 21 exibem as perdas de cargas e as equações das curvas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 19 – Perda de carga da curva 1



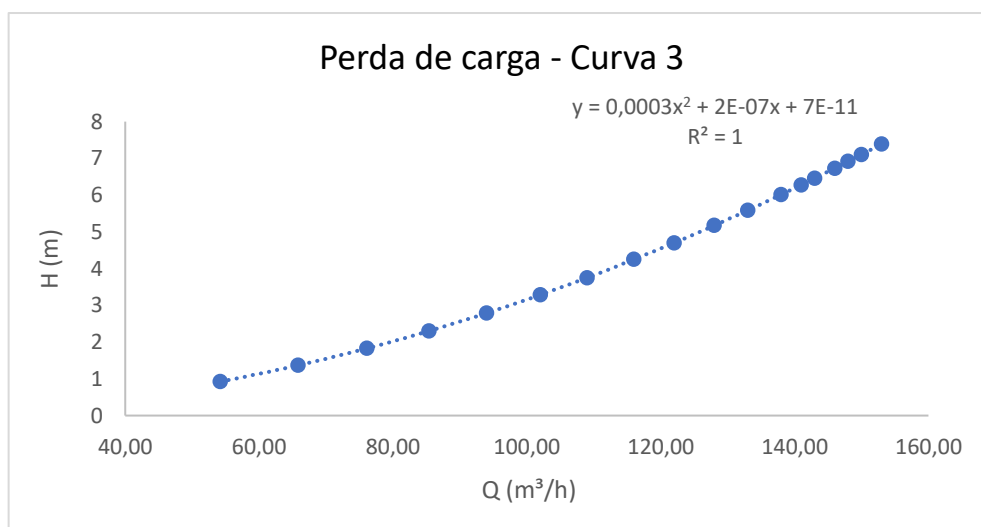
Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Perda de carga da curva 2



Fonte: Autoria Própria

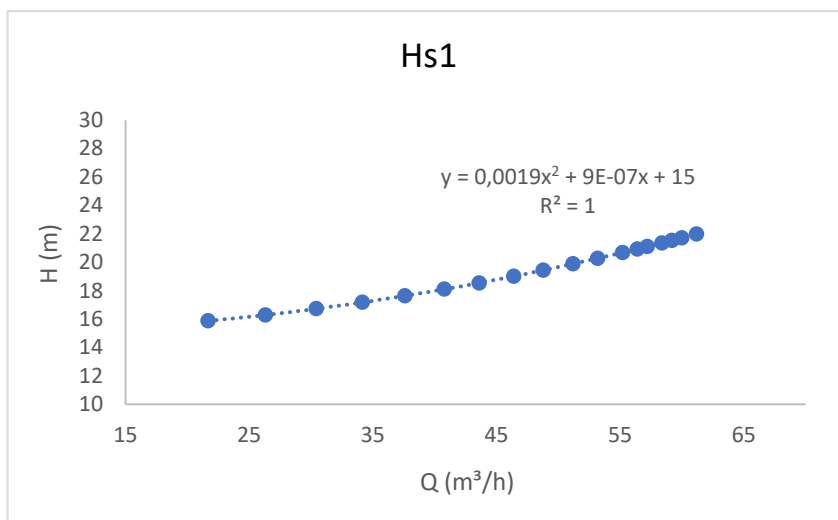
Figura 21 – Perda de carga da curva 3



Fonte: Autoria Própria

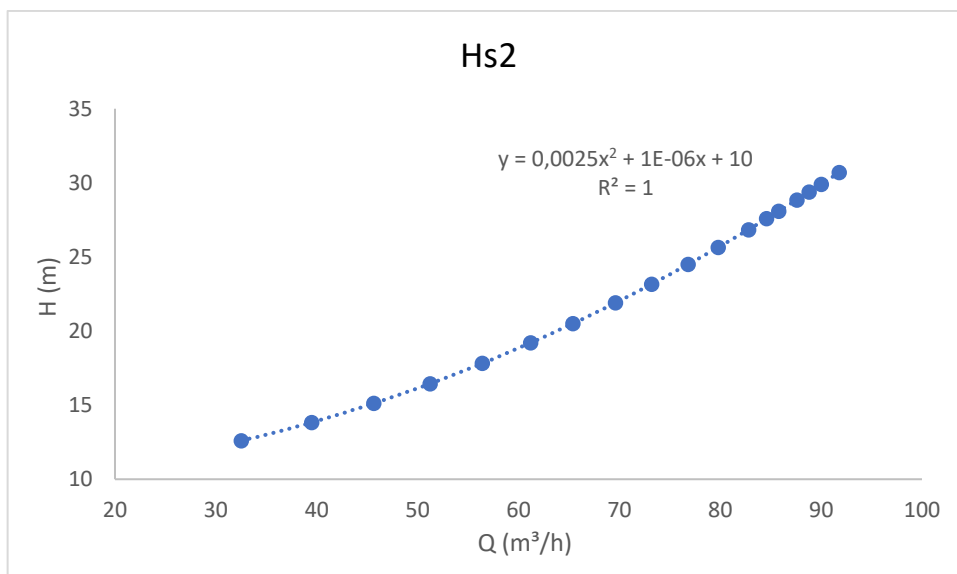
As figuras 22, 23 e 24 exibem as alturas manométricas e as equações das curvas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 22 – Altura manométrica da curva 1



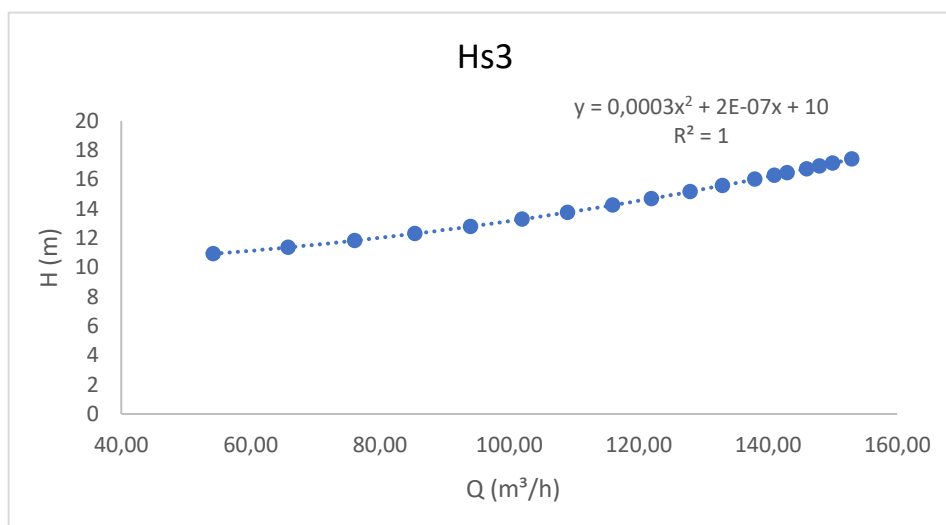
Fonte: Autoria Própria

Figura 23 – Altura manométrica da curva 2



Fonte: Autoria Própria

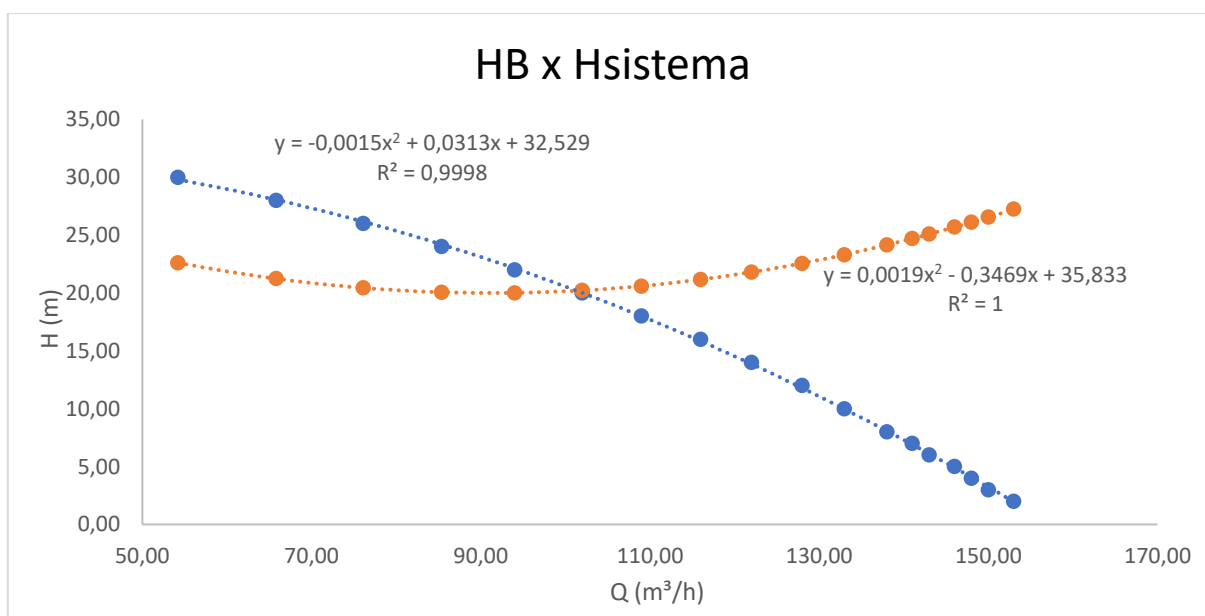
Figura 24 – Altura manométrica da curva 3



Fonte: Autoria Própria

Após encontrar as curvas é imprescindível seguir o passo a passo da seção 2.10 com a intenção de obter o ponto de funcionamento (figura 25).

Figura 25 – Ponto de Funcionamento da bomba MSA-21 R/F 2 1/2, com 15 CV de potência

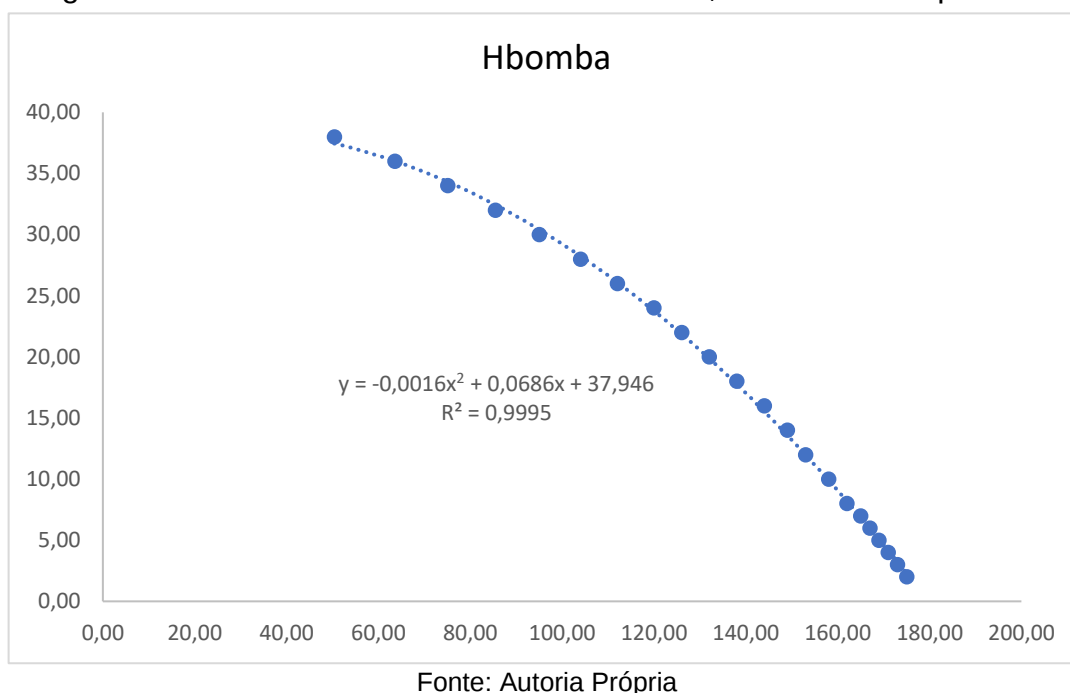


Fonte: Autoria Própria

A bomba não é adequada, pois o ponto de funcionamento ocorre a uma vazão de 102,4 m³/h e a uma altura de 21,1 metros, assim, não atinge a vazão requisitada para os reservatórios.

Já que a primeira bomba analisada não correspondeu às exigências, outra foi pré selecionada, a motobomba centrífuga mono-estágio, rotor semiaberto, modelo MSA-21 R/F 2 1/2, com uma potência de 20 CV e Motor WEG IP-55, 2 polos, 60 Hz. A figura 27 mostra a curva do equipamento citado.

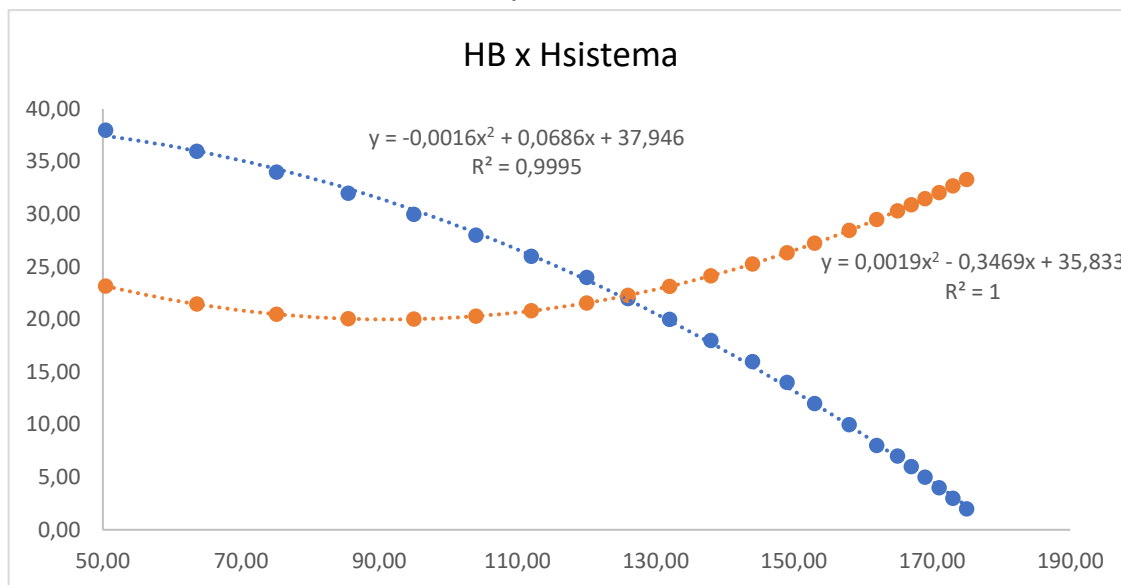
Figura 26 – Curva da bomba MSA-21 R/F 2 1/2, com 20 CV de potência



As perdas de carga e as alturas manométricas das curvas 1, 2 e 3, serão as mesmas da bomba anterior (figuras 31, 32, 33, 34, 35 e 36), pois os dados de entrada mutáveis devido ao equipamento, diâmetro da tubulação, serão os mesmos.

Dessa maneira, a próxima etapa é obter o ponto de funcionamento da bomba (figura 28) e, em seguida, calcular o NPSH disponível e requerido (figura 29).

Figura 27 – Ponto de Funcionamento da bomba MSA-21 R/F 2 1/2, com 20 CV de potência



Fonte: Autoria Própria

Figura 28 – Cálculo NPSH bomba MSA-21 R/F 2 1/2, com 20 CV de potência

Rotação (rpm)	3600
Vazão (m³/s)	0,034333333
Altura (m)	22
Tipo de bomba	Centrífugas radiais
FS Norma	1,2

Fator p/ NPSH	
Centrífugas radiais	0,0011
Helicoidais e helicoaxiais	0,0013
Axial	0,00145

NPSHdisp (m)	10,3677074
Coeficiente de cavitação	0,291419
NPSHreq (m)	6,41120996
NPSHreq com FS Norma	7,69345195

Fonte: Autoria Própria

Diante do exposto, o ponto de funcionamento ocorre a uma vazão de 123,6 m³/h e a uma altura de 22 metros, atendendo, assim, aos requisitos da aplicação prática. Ainda depreende-se a não ocorrência de cavitação para o ponto obtido.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A presente pesquisa científica abordou tópicos referentes à seleção de bomba hidráulica para atender dois reservatórios em patamares distintos. Neste trabalho, o autor buscou explorar os fatores determinantes para um dimensionamento mais eficiente, reduzindo, também, os geradores de erros mais comuns nesse processo.

Com o intuito de apresentar e explicar melhor o funcionamento da planilha foi adotada uma aplicação prática de irrigação em uma fazenda de soja que foi atendida com a bomba MSA-21 R/F 2 1/2, com 20 CV de potência.

Assim, conforme metodologia proposta, a aplicação prática e a validação com modelos da literatura (Apêndice B), infere-se que os resultados obtidos foram satisfatórios, logo, o trabalho atingiu seus objetivos.

Como sugestões para trabalhos futuros, vale a aplicação do método de seleção AHP, além da análise de custos do projeto.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 16401-1 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações**, 2008.
- ASHRAE Handbook Refrigeration 2017. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers Inc.
- BRASIL, A. N. **Máquinas Termo hidráulicas de Fluxo**.
- CLAUDINO, C. M. A.; DINIZ, M. I. L.; SILVA, A. O.; SENA, T. S. **Bombas Hidráulicas**: Uma abordagem quanto as grandezas características, classificação e problemas. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 5., 2020. Disponível em < <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/72733> >. Acesso em: 01 março.2022.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. A. **Mecânica dos Fluidos**: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: AMGH, 2012.
- DE MATTOS, E.E., DE FALCO, R., **Bombas Industriais**, 2 ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência, 1998.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER N. **Ecofisiologia da Soja**. Embrapa. Londrina – PR, setembro de 2007.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GOMES, G. A. P. M. **Seleção de bomba centrífuga vertical para operação em um sistema de transferência de enxofre líquido**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro – RJ. 2013.
- LIMA, E.P.C., **Mecânica das bombas**, 2 ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2003.
- LOPES, S. S. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LTCE, 2007.
- MACINTYRE, A. B. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC-USP, 4. ed., 2006.
- SCHNEIDER MOTOBOMBAS. *Tabela de seleção de bombas e motobombas*. São Paulo: Franklin Eletric, 2019.

APÊNDICE A – CRIAÇÃO DA PLANILHA

Os locais de inserção dos valores das variáveis de entrada estão representados nas figuras 29 e 30, respectivamente.

Figura 29 – Inserção de variáveis de entrada

Variáveis de Entrada					
	Comprimento Linear (m)	Altura final (m)	Diâmetro (mm)	Temperatura do fluido (°C)	Material do Tubo
AB					
DB1					
DB2					
DB3					

Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Inserção de dados sobre singularidades

INTERFACE DE CÁLCULO								
Diâmetro(mm)	CÓDIGO CONEXÃO	QUANTIDADE	Leq	POSIÇÃO	LeqAB	LeqDB1	LeqDB2	LeqDB3
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			0		0	0	0	0
			TOTAL:		0	0	0	0

Fonte: Autoria Própria

Na segunda página do setor “Variáveis de Entrada” (figura 30) os códigos de conexão devem ser preenchidos pelas legendas que representam cada singularidade (figuras 31 e 32) e o diâmetro tem que ser preenchido por algum dos diâmetros disponíveis (figura 33).

Figura 31 – Tipos de conexões e suas respectivas legendas: parte 1

COTOVELO 90° RAI0 LONGO	COTOVELO 90° RAI0 MÉDIO	COTOVELO 90° RAI0 CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Tipos de conexões e suas respectivas legendas: parte 2

REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Fonte: Autoria Própria

Figura 33 – Diâmetros disponíveis

DIÂMETROS DISPONÍVEIS (mm)
13
19
25
32
38
50
63
75
100
125
150
200
250
300
350

Fonte: Autoria Própria

Com base nesses valores e na bomba selecionada são calculados o número de Reynolds, o fator de atrito, a velocidade do fluido e a perda de carga total pelas equações: 4, 7, 3 e 8, respectivamente. A figura 34 mostra a interface onde são realizados os cálculos, no caso do trecho antes da bomba.

Figura 34 – Cálculo da Perda de Carga

Descrição	Hb	Q (m³/s)	Reynolds	Rugosidade Relativa	Fator de Atrito	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Total (m)
AB							

Fonte: Autoria Própria

Após isso são gerados automaticamente os gráficos das perdas de carga e altura manométrica de cada trecho.

No setor NPSH (figura 35) as variáveis de entrada são rotação da bomba (rpm), vazão do fluido (m³/s), altura manométrica do sistema (m), tipo de bomba utilizado e fator de segurança estipulado pela norma. Com esses valores são calculados o NPSH disponível, coeficiente de cavitação, NPSH requerido. Os fatores citados são calculados pelas equações: 12, 13 e 14, respectivamente.

Figura 35 – Setor “NPSH”

Rotação (rpm)		Fator p/ NPSH	
Vazão (m³/s)		Centrífugas radiais	0,0011
Altura (m)		Helicoidais e helicoaxiais	0,0013
Tipo de bomba		Axial	0,00145
FS Norma	1,2		
		NPSHdisp (m)	
		Coeficiente de cavitação	
		NPSHreq (m)	
		NPSHreq com FS Norma	

Fonte: Autoria Própria

As outras páginas da planilha são os dados das imagens 3, 5 e 9.

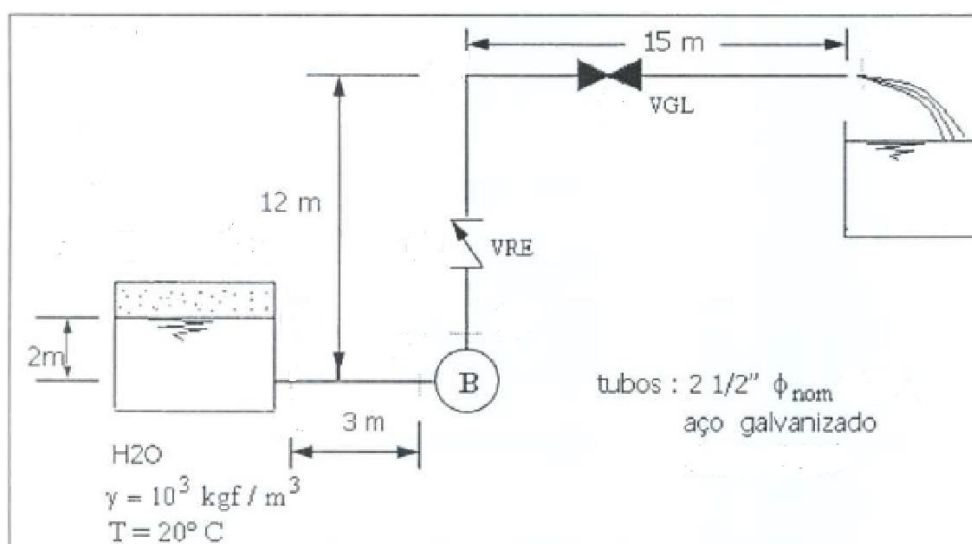
APÊNDICE B – VALIDAÇÃO DA PLANILHA

Devido à dificuldade de encontrar casos de uma bomba alimentado reservatórios em patamares diferentes foi utilizado um exemplo de uma máquina abastecendo um reservatório, exemplo de cálculo 3.7 do livro Bombas e Instalações Hidráulicas do Lopes, 2007.

Portanto, nos espaços que devem ser preenchidos com as informações sobre o segundo reservatório serão iguais a 0.

O exemplo citado está representado na figura 36 e possui as singularidades exibido na figura 37.

Figura 36 - Exemplo 3.7 do livro Bombas e Instalações Hidráulicas



Fonte: Adaptado Lopes (2007)

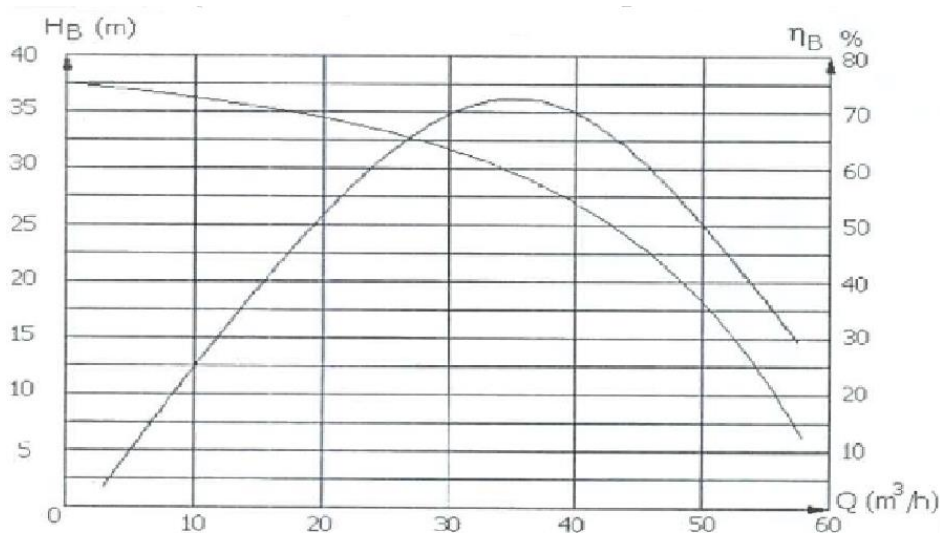
Figura 37 - Dados sobre singularidades do exemplo 3.7

Singularidade (tipo)	ϕ_{nom}	Leq (m) de tubo 2 1/2"
comprimento real do tubo	2 1/2"	30,0
saída normal de tanque p/tubo	tanque p/ 2 1/2"	1,2
saída da bomba(alargamento)	(*) 2" x 2 1/2"	0,5
válv. de retenção(levantamento)	2 1/2"	26,8
cotovelo 90°	2 1/2"	2,4
válvula globo(reta sem guia)	2 1/2"	21,4
comprimento total : LT =		82,3

Fonte: Lopes (2007)

A bomba do exemplo está representada pela figura 38 que analiticamente foi transformada nos pontos mostrados na figura 39.

Figura 38 - Curva da bomba exemplo 3.7



Fonte: Lopes (2007)

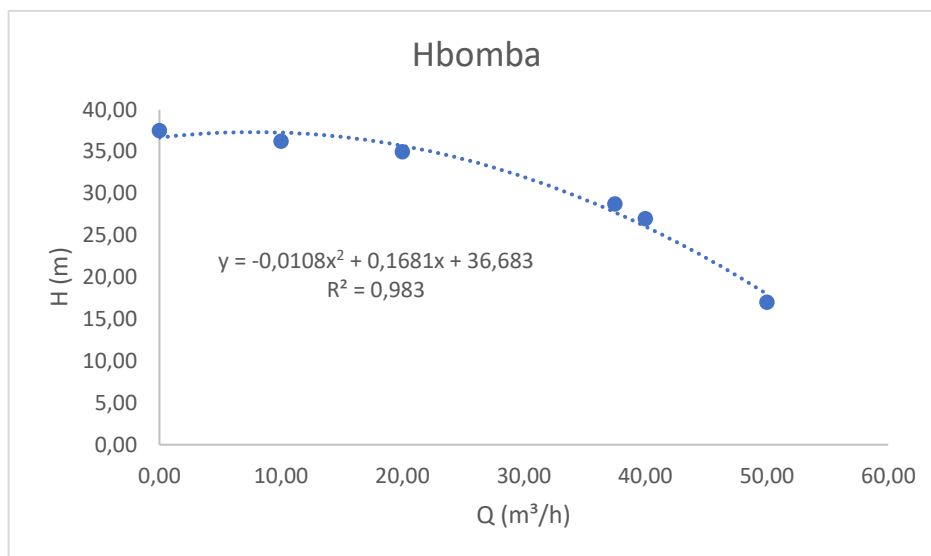
Figura 39 - Pontos da bomba exemplo 3.7

Hb (m)	Q(m ³ /h)
37,50	0,00
36,25	10,00
35,00	20,00
28,75	37,50
27,00	40,00
17,00	50,00

Fonte: Autoria Própria

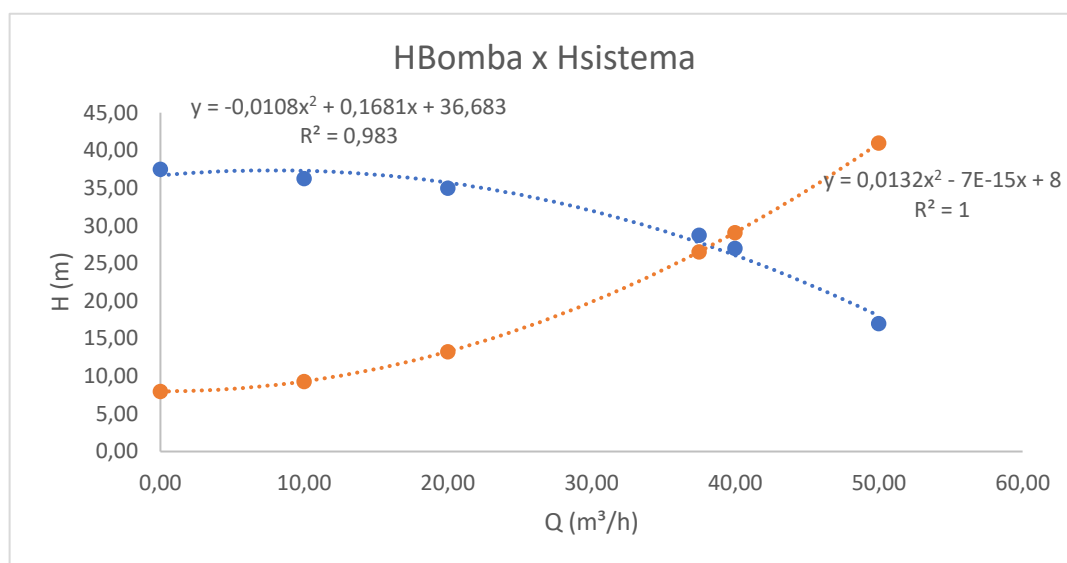
Com base nos dados apresentados do exemplo 3.7 e com os pontos da figura 40 foi encontrado uma vazão de 39,4 m^3/h e uma altura manométrica de 26,5 m utilizando a planilha. As figuras 40 e 41 mostram, respectivamente a curva da bomba plotada com base nos dados da figura 39 e o ponto de funcionamento.

Figura 40 - Curva da Bomba plotada com base nos dados da figura 39



Fonte: Autoria Própria

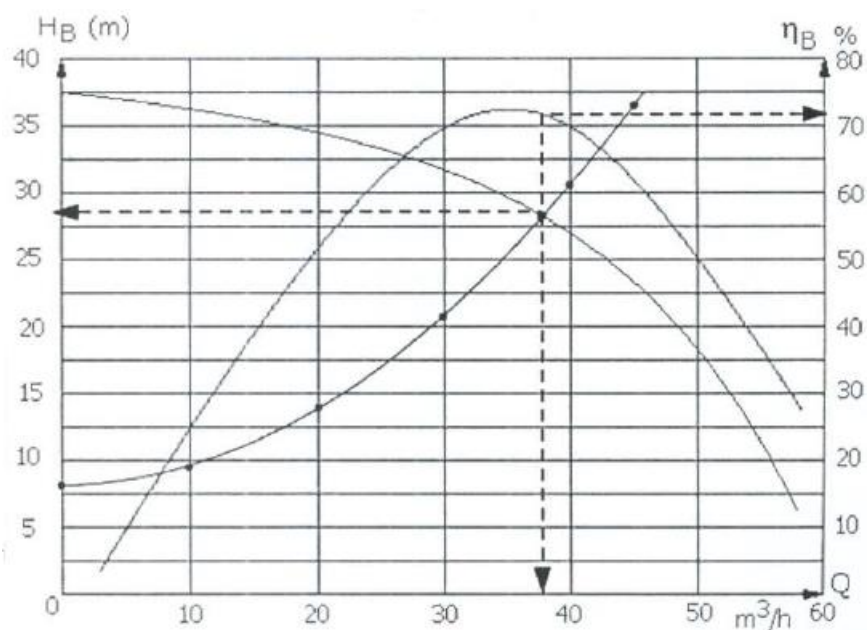
Figura 41 - Ponto de funcionamento da bomba encontrado na planilha



Fonte: Autoria Própria

No exemplo 3.7, Lopes (2007) obteve um resultado de 37,5 m³/h para vazão e o ponto de funcionamento demonstrado na figura 42.

Figura 42 - Ponto de funcionamento da bomba



Fonte: Adaptado Lopes (2007)

A diferença de aproximadamente de 5% entre o resultado da planilha e do livro pode ser justificado devido aos pontos da bomba adotados para a construção da curva da bomba na planilha, já que o autor não deu os pontos exatos.

Logo, a planilha foi validada.