

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL – FECIV
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARCELA BRANDÃO JANUÁRIO

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA ELETRÔNICA PARA O
DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES DE RECALQUE E SELEÇÃO DE
BOMBAS PARA EDIFÍCIOS MULTIFAMILIARES VERTICAIS**

**UBERLÂNDIA
2023**

MARCELA BRANDÃO JANUARIO

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA ELETRÔNICA PARA O
DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES DE RECALQUE E SELEÇÃO DE
BOMBAS PARA EDIFÍCIOS MULTIFAMILIARES VERTICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial para
a obtenção do título de bacharel em Engenheiro
Civil

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

**UBERLÂNDIA
2023**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

J35
2023

Januario, Marcela Brandão, 1999-
Desenvolvimento de planilha eletrônica para o dimensionamento de instalações de recalque e seleção de bombas para edifícios multifamiliares verticais [recurso eletrônico] / Marcela Brandão Januario. - 2023.

Orientador: André Luiz de Oliveira.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil. I. Oliveira, André Luiz de, 1974-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

MARCELA BRANDÃO JANUARIO

Desenvolvimento de planilha eletrônica para o dimensionamento de instalações de recalque e seleção de bombas para edifícios multifamiliares verticais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenheiro Civil.

Banca de avaliação:

Prof. Dr. André Luiz de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira
Membro

Prof. Msc. Iridalques Fernandes de Paula
Membro

Uberlândia (MG), 06 de fevereiro de 2023.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado às vozes em minha cabeça, que são minhas amigas mais surpreendentes. E à minha avó, que mora conosco.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, Brandão e Vera, por terem sido meus pais quando os biológicos não puderam e por me proporcionarem suporte para ingressar na universidade. Agradeço também meus tios Alessandro, Paula, Joelma e Diego e meu primo Pedro por sempre me apoiarem e a minha mãe por sempre estar ao meu lado.

Gratifico todos os meus professores, que contribuíram para a construção da minha estrada na engenharia civil. Em especial o professor José Eduardo Alamy Filho, que inspirou minha paixão e curiosidade por mecânica dos fluidos com suas aulas didáticas e aprofundadas. E ao meu professor orientador André Luiz de Oliveira por ter aceitado o convite de orientar o trabalho, e ter prestado o suporte necessário.

Aos meus amigos, por tornarem minha vida mais colorida e bela, minha eterna gratidão.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional, utilizando o software Microsoft Excel, para o dimensionamento de instalações de recalque de água e seleção de bombas. A planilha eletrônica fornece o diâmetro para a instalação utilizando a equação de Forchheimer, desde que seja alimentada com os dados de consumo diário, tempo de reposição do reservatório superior e material da tubulação. Caso o usuário complemente a planilha com os comprimentos equivalentes dos acessórios instalados na linha, desníveis geométricos e características hidráulicas da bomba pretendida, a planilha fornecerá o ponto de trabalho do conjunto motobomba na instalação projetada, NPSH disponível e potência de trabalho. Recomenda-se o uso dessa ferramenta em projeto de instalações de recalque de edifícios multifamiliares verticais.

Palavras-chave: Instalações de recalque de água. Seleção de bombas. Mecânica dos fluidos.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a computational tool using the Microsoft Excel software for the sizing of water piping installations and pump selection. The electronic spreadsheet provides the diameter for the installation using the Forchheimer equation, as long as it is fed with the daily consumption data, the upper tank refill time, and the pipeline material. The spreadsheet will provide the operating point of the motor-pump set in the designed installation, available NPSH and working power if the user complements the spreadsheet with the equivalent lengths of the accessories installed in the line, geometric elevations, and hydraulic characteristics of the intended pump. The use of this tool is recommended for the design of water pumping installations in vertical multi-family buildings.

Keywords: Water pumping installations, Pump selection. Fluid mechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aparato original de Reynolds	2
Figura 2: Escoamento pela tubulação de um tanque	3
Figura 3: Reservatório de pequena seção transversal	3
Figura 4: Redução gradual em uma tubulação circular	4
Figura 5: Equação da Continuidade para um duto convergente	4
Figura 6: Representação gráfica da Equação de Bernoulli	5
Figura 7: Distribuição de velocidades em um conduto circular	6
Figura 8: Bomba centrífuga com pás guias, bipartida radialmente	11
Figura 9: Instalações típicas de bombeamento	11
Figura 10: Curva do sistema	12
Figura 11: Instalação utilizada em ensaios de bombas	13
Figura 12: Aba <i>Entrada</i> da planilha	17
Figura 13: Espaço destinado para a inserção das perdas de carga do trecho de recalque	18
Figura 14: Espaço destinado para a inserção das perdas de carga do trecho de sucção	18
Figura 15: Aba para inserção das características hidráulicas do motobomba	19
Figura 16: QRCode de acesso a planilha	19
Figura 17: Dados do empreendimento na aba <i>Entrada</i>	21
Figura 18: Perdas de carga no trecho de recalque	21
Figura 19: Perdas de carga no trecho de sucção	22
Figura 20: Características hidráulicas do modelo ME 24150 da Schneider	22
Figura 21: Potência e NPSDd na aba Automação da planilha	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regime de escoamento e o Número de Reynolds	3
Tabela 2: Classificação e descrição segundo a trajetória do líquido no rotor	10
Tabela 3: Valores de $k\sigma$ em função do tipo de bomba	16
Tabela 4: Taxa de ocupação de acordo com a natureza do local.....	20
Tabela 5: Discriminação do número de unidades atendidas.....	20
Tabela A. 1: Dimensões tubos linha Aquatherm - Tigre.....	25
Tabela A. 2: Dimensões tubos linha Soldável - Tigre.....	25
Tabela A. 3: Propriedades físicas da água.....	26

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1	Mecânica dos fluidos e hidráulica.....	1
2.1.1	Viscosidade.....	1
2.1.2	Escoamento de fluidos.....	1
2.1.3	Equação da Continuidade.....	4
2.1.4	Equação da energia.....	5
2.1.5	Perda de carga em condutos circulares.....	7
2.2	Classificação e descrição de máquinas hidráulicas.....	8
2.2.1	Máquinas geratrizes ou bombas.....	9
2.2.2	Turbobombas.....	9
2.3	Energia cedida ao líquido, potência, rendimento e cavitação.....	11
2.3.1	Altura manométrica.....	12
2.3.2	Curvas características da bomba.....	12
3.	DESENVOLVIMENTO DA PLANILHA.....	16
4.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	20
5.	CONCLUSÃO.....	23
	REFERÊNCIAS.....	24
	APÊNDICE A – Tabelas de referência para automação da planilha.....	25
	APÊNDICE B – Principal código da planilha eletrônica.....	27

1. INTRODUÇÃO

O transporte de líquidos de um ponto para o outro é um dos problemas clássicos da hidráulica. Se a condução for feita em sentido descendente, aproveita-se a energia potencial contida no líquido (transporte por gravidade). Se o sentido do transporte for ascendente, há necessidade de fornecimento de energia ao líquido, realizado pelo conjunto motobomba através de instalações de recalque. O projeto e instalação de um sistema de bombeamento é composto basicamente por tubulação de sucção, um conjunto motobomba e uma tubulação de recalque.

Foi pensando tornar mais prático o desenvolvimento de projetos de sistemas de recalque que foi desenvolvido um programa em ambiente Excel para possibilitar ao estudante de engenharia, calcular de maneira automática o interno de tubulações de recalque e sucção, o ponto de operação do conjunto motobomba na instalação dimensionada e exportar um memorial de dimensionamento em pdf, desde que conhecidos os desníveis geométricos, consumo diário do empreendimento, tipo de material da tubulação, acessórios ao longo da linha, como válvulas e curvas, e as características hidráulicas da motobomba. A planilha eletrônica desenvolvida é uma alternativa confiável e gratuita para estimar o diâmetro de uma instalação de recalque de água e analisar o comportamento de bombas hidráulicas pré-selecionadas na instalação, proporcionando ao usuário uma ferramenta para aferição de cálculos e confecção de projetos hidráulicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA

2.1.1 Viscosidade

A Lei de Viscosidade de Newton considera o caso de um fluido confinado entre duas placas em repouso, inicialmente. Se uma das placas for deslocada com determinada velocidade, o fluido em contato com a placa também será deslocado em mesma velocidade, pela condição de não deslizamento. A força necessária para deslocar a placa por unidade de área será proporcional velocidade e inversamente proporcional a distância entre as placas. A constante de proporcionalidade entre estas medidas é conhecida como viscosidade. A água, líquido cujo transporte será dimensionado neste trabalho é considerado um líquido newtoniano pois obedece a Lei de viscosidade de Newton.

Macintyre (1987) pontua que durante o estudo preliminar de instalações de bombeamento considera-se o líquido perfeito, isto é, ideal, incompressível, perfeitamente móvel, desconsiderando-se o atrito interno, ou seja, que não tem viscosidade. O movimento relativo entre as partículas do fluido resulta em atrito, propriedade responsável por expressar a dificuldade de um fluido escoar, conhecida como viscosidade dinâmica do fluido, e sofre influência da temperatura.

2.1.2 Escoamento de fluidos

A dinâmica dos fluidos é um dos problemas de maior complexidade dentro da física, tanto na observação experimental como na descrição teórica. Esta complexidade está ligada a existência

de muitas variáveis para sua descrição matemática. Podemos classificar os movimentos dos fluidos quanto a instabilidade, variação temporal e variação espacial.

2.1.2.1 Classificação quanto ao grau de instabilidade

A experiência de Reynolds (1883) demonstrou a existência de dois tipos de escoamentos, o laminar e o turbulento. Santos (2000) nos propõe a visualizar o experimento de Reynolds como sendo a inserção de um pequeno tubo, contendo corante no fluido em seu interior, em outro de diâmetro maior e material transparente, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Aparato original de Reynolds



Fonte: Manchester School of Engineer (1975)

Para pequenas vazões o líquido corante forma um filete contínuo paralelo ao eixo do tubo, enquanto vazões crescentes induzem oscilações, podendo culminar no completo desaparecimento do filete. Durante o escoamento laminar conclui-se que as partículas se movem sem agitações transversais, já para o escoamento turbulento velocidades transversais são observadas.

A natureza do escoamento é indicada pelo Número de Reynolds (Re), ou seja, pela relação entre os efeitos adjetivos e difusos, e para condutos circulares de diâmetro D é descrita conforme Equação 1.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

Em que:

ρ = Massa específica ($\rho_{\text{Água}_{20^{\circ}\text{C}}} = 1000 \text{Kg/m}^3$);

v = Velocidade do escoamento (m^3/s);

D = Diâmetro interno da tubulação (m);

μ = viscosidade dinâmica ($\mu_{\text{Água}_{20^{\circ}\text{C}}} = 0,00101 \text{ N.s/m}^2$).

Em condutos forçados, ou seja, tubulações pressurizadas valores para o Número de Reynolds maiores que 4000 caracterizam o regime turbulento, enquanto valores menores que 2000 categorizam regimes laminares, e há ainda os valores compreendidos entre ambos, cujo regimes são denominados de transição, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Regime de escoamento e o Número de Reynolds

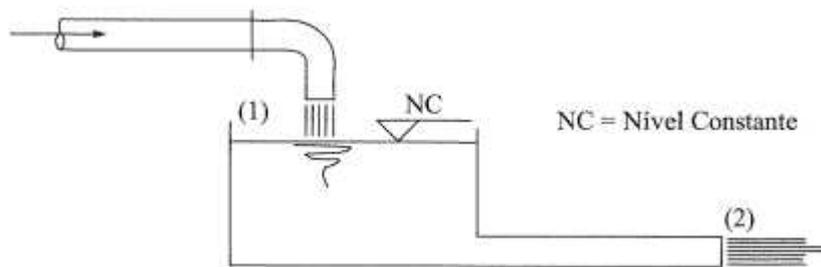
Regime	Condutos livres	Condutos forçados
Laminar	$Re < 500$	$Re < 2000$
Transição	$500 < Re < 1000$	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	$Re > 1000$	$Re > 4000$

Fonte: Adaptado de Baptista (2010)

2.1.2.2 Classificação quanto à variação temporal

As propriedades dos fluidos, como vazão, podem ser invariáveis em cada ponto com o tempo, essa é a característica de um estado denominado estacionário, ou ainda, regime permanente. Por exemplo o escoamento pela tubulação de um tanque, Figura 2. Neste tanque, a quantidade de líquido que entra em (1) é idêntica à quantidade que sai em (2) portanto, nessas condições as propriedades do fluido são invariáveis.

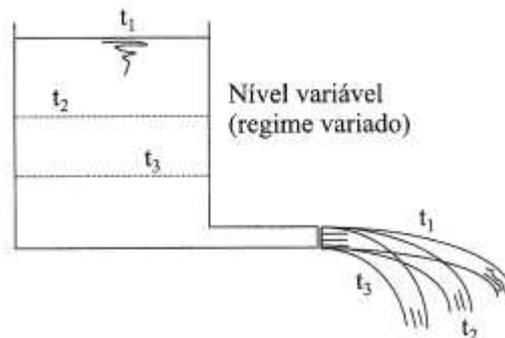
Figura 2: Escoamento pela tubulação de um tanque



Fonte: Brunetti (2008)

Regime transiente, ou variado, ocorre quando as condições do fluido são variáveis com o tempo em alguns pontos ou regiões. Por exemplo em um reservatório de pequena seção transversal em face da descarga do fluido, sendo que o nível varia sensivelmente com o tempo, como na Figura 3.

Figura 3: Reservatório de pequena seção transversal

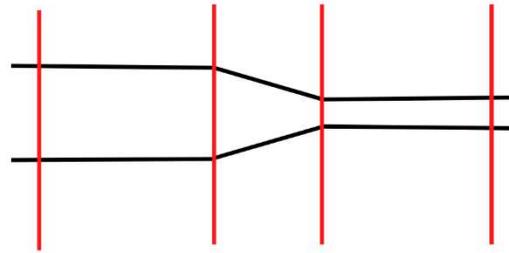


Fonte: Brunetti (2008)

2.1.2.3 Classificação quanto à variação espacial

Um escoamento é classificado como uniforme quando a velocidade do fluido é constante em qualquer seção normal ao escoamento ($dv/ds = 0$). Velocidades que variam em cada seção transversal ao longo do escoamento ($dv/ds \neq 0$), caracterizam o escoamento em variado, conforme Figura 4.

Figura 4: Redução gradual em uma tubulação circular



$$\frac{dv}{ds} = 0 \quad \frac{dv}{ds} \neq 0 \quad \frac{dv}{ds} = 0$$

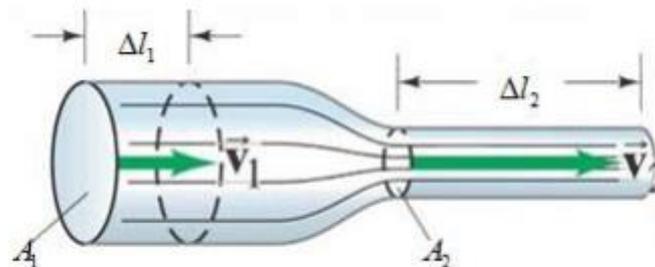
Fonte: Autora

2.1.3 Equação da Continuidade

O escoamento é governado por Equações Diferenciais Parciais e baseia-se nos princípios físicos de Conservação de Massa, Equação da Continuidade, e na Segunda Lei de Newton, Equação de Quantidade de Movimento.

Segundo Gomes et al. (2012) a equação da continuidade resulta do princípio de conservação de massa, que aplicado ao escoamento da Figura 5 garante que, em regime permanente, a massa que atravessa a área A_1 por unidade de tempo é igual a que atravessa A_2 . Em fluidos incompressíveis o mesmo ocorre na relação volume por tempo.

Figura 5: Equação da Continuidade para um duto convergente



Fonte: Gomes et al. (2012)

$$\frac{A_1 \Delta l_1}{\Delta t} = \frac{A_2 \Delta l_2}{\Delta t} = Q_1 = Q_2 = \text{Constante} \quad (2)$$

Em fluidos incompressíveis a densidade do fluido (ρ) é constante, ou seja, não existe variação de volume.

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = V \quad (3)$$

Substituindo a Equação 3 na 2 tem-se a Equação da Continuidade para regimes permanentes (Equação 4).

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q = \text{Constante} \quad (4)$$

Em que:

Q = Vazão (m^3/s);

V = Velocidade média (m/s);

A = Área (m^2).

2.1.4 Equação da energia

Gomes et al. (2012) descreve o princípio de Bernoulli em escoamentos permanentes de fluidos incompressíveis e não viscosos, garantindo que um incremento de velocidade e, conseqüentemente, energia cinética, causa um decréscimo na pressão ou na energia potencial. Isto significa que se uma parcela de energia cresce, outra decresce de igual valor, de modo que a soma das três sempre resulta em um mesmo valor, chamado constante de Bernoulli.

Podemos escrever o princípio de Bernoulli na forma de energia por unidade de peso de fluido escoado resultando na Equação 5 e representado na Figura 6.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \text{Constante} \quad (5)$$

Em que:

p = Pressão (N/m^2);

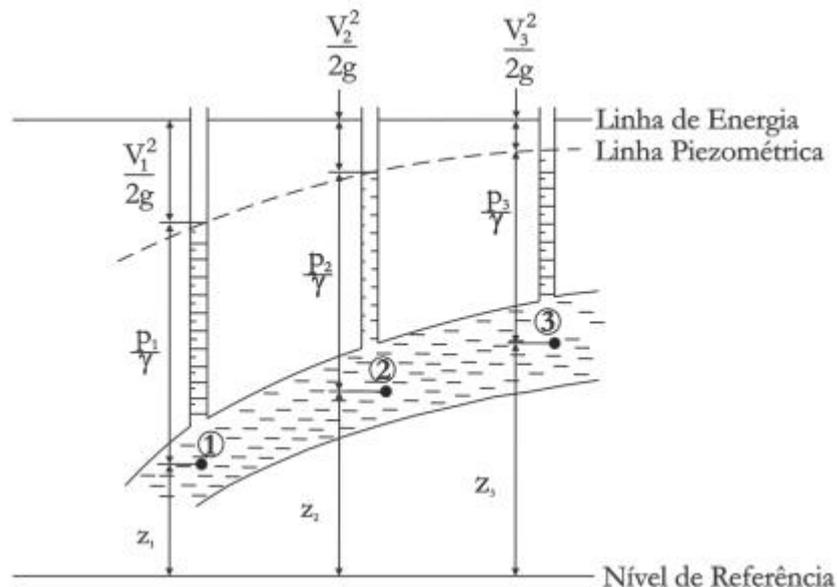
ρ = Massa específica (Kg/m^3);

g = Aceleração da gravidade (m/s^2);

V = Velocidade média (m/s);

z = Cota em relação ao nível de referência (m).

Figura 6: Representação gráfica da Equação de Bernoulli



Fonte: Gomes et al. (2012)

Fluidos reais se afastam do modelo perfeito, pois na dedução do teorema foram feitas as hipóteses:

- Não há influência da viscosidade;
- O fluido escoava em regime permanente;

- c) O escoamento ocorre ao longo de um tubo de corrente, conforme Figura 1;
 d) O líquido é incompressível.

Sabe-se que a viscosidade e o atrito externo causam perda de energia irrecuperável, portanto é introduzido um termo corretivo na Equação 5 (Δ_h), dando origem a Equação da Energia, ou Bernoulli generalizado.

Pode-se, na prática, adicionar energia ao fluido através de um conjunto motobomba (Δ_b), ou retirar energia através de uma turbina (Δ_t).

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \Delta_b - \Delta_h - \Delta_t = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (6)$$

Em que:

γ = Peso específico (N/m³);

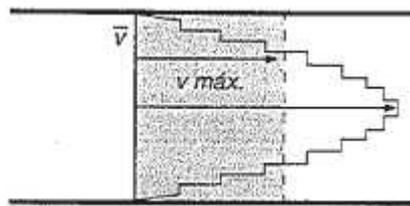
Δ_b = Energia fornecida pelo conjunto motobomba (m);

Δ_h = Energia perdida (m);

Δ_t = Energia extraída (m).

Além da correção acima (Equação 6), é adicionado o coeficiente de Coriolis (α) pois a dedução considerou uma determinada velocidade para cada seção, porém, na prática verifica-se a variação da velocidade de ponto para ponto numa mesma seção, conforme Figura 7. O valor de α varia entre 1, para situações em que houver uma velocidade única na seção, e 2, em canalizações onde a velocidade varia parabolicamente de 0 junto às paredes do tubo. Usualmente esse termo é emitido da equação por se aproximar da unidade.

Figura 7: Distribuição de velocidades em um conduto circular



Fonte: Azevedo (1998)

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \Delta_b - \Delta_h - \Delta_t = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (7)$$

Azevedo (1998, p. 60) conclui que:

O enunciado geral do teorema de Bernoulli fica sendo, portanto:

“Para um escoamento contínuo e permanente, a carga total de energia, em qualquer ponto de uma linha de corrente é igual a carga total em qualquer ponto a jusante da mesma linha de corrente, mais a perda de carga entre os dois pontos”.

A adoção no enunciado acima da “linha de corrente” visa minimizar a necessidade da introdução do coeficiente de correção α acima explicado. Ou seja, medindo-se sempre as energias no centro do tubo, por exemplo, se o diâmetro e a rugosidade forem sempre iguais, não é necessário o coeficiente α .

Define-se linha de corrente como a linha tangente aos vetores velocidades e está se aproxima as trajetórias no escoamento permanente.

Segundo Porto (2006) o coeficiente de Coriolis é importante ser considerado em escoamentos livres, nos quais a distribuição de velocidade em uma seção é menos uniforme que no escoamento forçado com seção circular.

2.1.5 Perda de carga em condutos circulares

O escoamento do líquido transforma parte de sua energia em calor, irrecuperável na forma de energia cinética e/ou potencial e, por isso, denomina-se perda de carga.

Baptista (2010) categoriza para efeito de estudo, a perda de carga, denotada neste trabalho por (Δ_h), é o somatório da perda de carga distribuída ($\Delta_{h'}$) com a perda de carga localizada ($\Delta_{h''}$), sendo a primeira considerada ao longo da tubulação, e a outra, devido à presença de conexões, aparelhos, entre outros, em pontos particulares do conduto.

O teorema fundamental da Análise Dimensional é instrumento na hidráulica experimental e, é enunciado da seguinte forma:

"Todo fenômeno físico representado por uma relação dimensionalmente homogênea de n grandezas físicas, na forma: $F(G_1, G_2, \dots, G_k, \dots, G_n) = 0$, pode ser descrito por uma relação de n - r grupos adimensionais independentes, $\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}) = 0$, em que r é o número de grandezas básicas ou fundamentais necessárias para expressar dimensionalmente as variáveis G_i ."

Para a Hidráulica o valor de r é, no máximo, 3, ou seja, existem no máximo 3 grandezas básicas necessárias para descrever dimensionalmente cada variável do fenômeno, vazão, energia e dimensão característica do escoamento.

Em escoamentos de líquidos reais, com velocidade média (V), caracterizado pela sua viscosidade dinâmica (μ) e massa específica (ρ), através de uma tubulação circular de diâmetro (D), comprimento (L) e coeficiente de rugosidade da parede (E), a queda de pressão ao longo do comprimento (L) pode ser tratada pelo teorema da Análise Dimensional, conforme Equação 8:

$$\Delta p = F(\rho, V, D, \mu, L, E) \quad (8)$$

Existem 4 grupos adimensionais independentes (Π) que descrevem o fenômeno físico do escoamento na sua totalidade, são eles respectivamente o Número de Euler (Equação 9), Número de Reynolds (Equação 1), rugosidade relativa (Equação 10) e a experiência mostra que a queda de pressão é diretamente proporcional ao comprimento (L) e inversamente ao diâmetro interno da tubulação (D).

$$\Pi 1 = \frac{\Delta p}{\rho V^2} \quad (9)$$

$$\Pi 2 = Re = \text{Equação 1}$$

$$\Pi 3 = \frac{E}{D} \quad (10)$$

$$\Delta p = \frac{L}{D} \quad (11)$$

Portanto a Equação 8 torna-se:

$$\frac{\Delta p}{\rho V^2} = \frac{L}{D} F\left(\frac{\rho V D}{\mu}, \frac{E}{D}\right) \quad (12)$$

A função F pode ser obtida experimentalmente e representada pelo fator de atrito da tubulação (f). Dito isso, a queda de pressão é dada por:

$$\Delta p = \rho f \frac{L}{D} V^2 \quad (13)$$

Como $\Delta p = \gamma \Delta h$ e $\gamma = \rho g$, substituindo na Equação 13 encontramos a equação de Darcy-Weisbach ou fórmula universal de perda de carga (Equação 14).

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

2.1.5.1 Perda de carga distribuída

A perda de carga distribuída (Δh_f) resulta do atrito interno do fluido e deste com as paredes da tubulação, e pode ser encontrada aplicando-se diretamente a Equação 14.

2.1.5.2 Perda de carga localizada

Conforme a norma da **ABNT NBR 5626: Sistemas prediais de água fria e água quente. Rio de Janeiro, 2020**, a perda de carga de uma dada singularidade, ou acessório, é dada pela Equação 15:

$$\Delta h_{L'} = k \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (15)$$

Em que:

k = Coeficiente de perdas (adimensional).

As perdas de carga singulares podem ainda ser calculadas através dos comprimentos equivalentes ($L_{\text{Equivalente}}$), com a aplicação da Equação 16. Neste caso, ao invés do coeficiente k, utiliza-se o comprimento equivalente de cada peça e soma-se os mesmos ao comprimento físico da tubulação (L_{Real}), obtendo dessa forma o comprimento virtual do trecho (L_{Virtual}).

$$L_{\text{Virtual}} = L_{\text{Equivalente}} + L_{\text{Real}} \quad (16)$$

2.2 CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS

As máquinas hidráulicas podem ser classificadas em três grandes grupos, máquinas motrizes, geratrizes e mistas. As máquinas motrizes transformam energia hidráulica em trabalho mecânico, como por exemplo turbinas e rodas hidráulicas. Geratrizes são aquelas que recebem o trabalho mecânico e o transformam em energia hidráulica gerando um acréscimo de energia ao líquido sob as formas potencial, pressão e cinética.

2.2.1 Máquinas geratrizes ou bombas

Para que o líquido seja deslocado por escoamento forçado é necessário o projeto e instalação de um sistema de bombeamento, composto basicamente por tubulação de sucção, um conjunto motobomba e uma tubulação de recalque. As máquinas geratrizes ou bombas podem ser classificadas segundo Macintyre (1987) pelo modo como é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e em como cedê-la ao líquido, são elas:

- a) Bombas de deslocamento positivo;
- b) Turbobombas ou dinâmicas;
- c) Bombas especiais.

2.2.2 Turbobombas

Macintyre (1987) caracteriza em turbobombas aquelas que possuem um rotor, que exerce sobre líquidos forças que resultam da aceleração que lhe imprime. A descarga gerada depende das características da bomba, do número de rotações e das características da instalação ao qual estiver ligada.

Azevedo (1998, p.45) define descarga como:

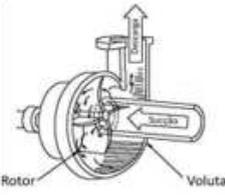
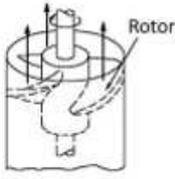
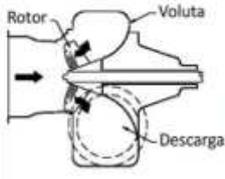
Chama-se vazão ou descarga, numa determinada seção, o volume de líquido que atravessa essa seção na unidade de tempo.

Na prática a vazão é expressa m^3/s ou em outras unidades múltiplas ou submúltiplas.

Existem diversas características utilizadas para classificar turbobombas, esse trabalho se limitara quanto a classificação segundo a trajetória do líquido no rotor e quanto ao número de rotores empregados. Segundo a trajetória do líquido no rotor são elas:

- a) Bomba centrífuga pura ou radial;
- b) Bomba de fluxo misto ou diagonal;
- c) Bomba axial ou propulsora.

Tabela 2: Classificação e descrição segundo a trajetória do líquido no rotor

Centrífugas ou radiais		<p>As pás são dispostas em planos radiais de forma que depois do líquido entrar no rotor pelo seu centro, percorre todo ele em trajetórias curvas dispostas sobre planos aproximadamente radiais. Caracterizam-se por possuírem grandes alturas manométricas e relativamente pequenas vazões e são as mais empregadas.</p>
Fluxo misto ou diagonal		<p>O líquido entra no rotor na direção do eixo e pela ação de suas pás assume trajetórias de hélices cilíndricas até chegar à saída do conjunto, onde voltam a ser axiais. Dai o fluido é conduzido ao tubo de descarga. Caracterizam-se por possuírem altas vazões e relativamente baixas alturas de elevação.</p>
Axial ou propulsora		<p>O fluido entra no rotor axialmente e encontra pás curvas e inclinadas com relação ao eixo. A trajetória de saída do rotor pode ser na direção intermediária entre a radial e axial, podendo então encontrar pás diretrizes que encaminham o líquido para a descarga ou para uma sucessão de novos rotores, no caso de bombas de múltiplos estágios. Com relação à altura manométrica e vazão, encontram-se no meio termo entre as radiais e axiais.</p>

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2012)

Enquanto para o número de rotores empregados, temos:

- a) Bomba de simples estágio;
- b) Bombas de múltiplos estágios.

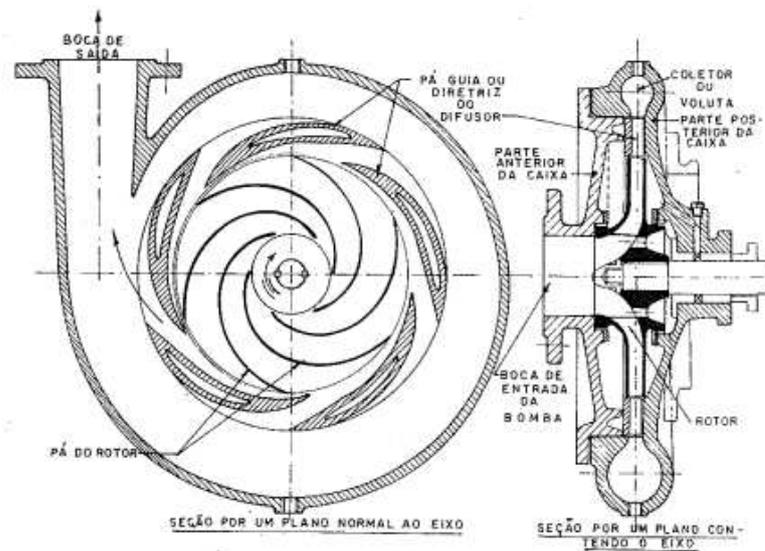
Bombas de simples estágio possuem somente um rotor enquanto as de múltiplos estágios possuem dois ou mais rotores, isso se dá alternativamente ao aumento excessivo das dimensões do rotor para vencer grandes alturas de elevação. No segundo caso todos os rotores são dispostos em série e fixados em um mesmo eixo, de modo que a descarga do primeiro é conduzida para a sucção do segundo, sucessivamente até que a pressão desejada seja alcançada.

2.2.2.1 Bomba centrífuga pura ou radial

As turbobombas centrífugas, Figura 8, denominadas dessa forma graças ao fato de ser a força centrífuga a principal responsável a fornecer energia ao líquido, são usadas no bombeamento de água do mar, condensados, óleos, lixívias, e predominantemente no transporte de água. Podem ser classificadas quanto a estrutura do rotor:

- a) Aberto: Usa-se para líquidos contendo pastas, lamas, areia, esgotos sanitários, entre outros como para bombeamentos de águas residuárias ou bruta de má qualidade. Geralmente os rotores abertos são encontrados em bombas pequenas, de baixo custo, ou em bombas que recalcam líquidos abrasivos;
- b) Semiaberto ou semifechado: Quando possui apenas um disco ou parede traseira onde se fixam as palhetas, empregadas em recalques de água bruta;
- c) Fechado: Quando, além do disco onde se fixam as pás, existe uma coroa circular também presa às pás. Pela abertura dessa coroa, o líquido penetra no rotor. São usados normalmente no bombeamento de líquidos limpos. É inadequado para o bombeamento de fluidos sujos como para água tratada ou potável porque, pela própria geometria, facilita o seu próprio entupimento.

Figura 8: Bomba centrífuga com pás guias, bipartida radialmente

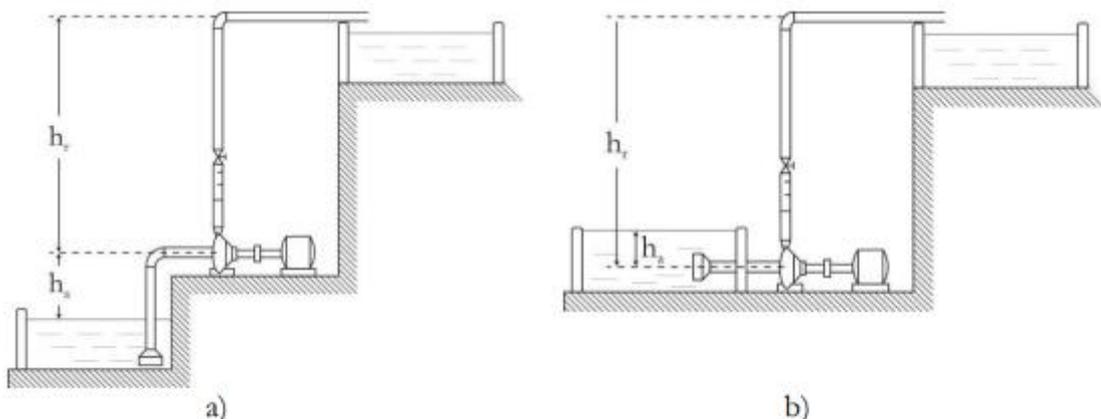


Fonte: Macintyre (1987)

2.3 ENERGIA CEDIDA AO LÍQUIDO, POTÊNCIA, RENDIMENTO E CAVITAÇÃO

A Figura 9 representa duas instalações de bombeamento típicas para instalações de recalque de água. Vários autores denominam a primeira, (a), em *aspiração*, ou seja, a bomba fica acima do nível do reservatório e a segunda, (b), em *afogada*, caracterizada por manter a bomba sempre escorvada, ou seja, completamente preenchida com fluido. Segundo Gomes et al. (2012) em ambas as instalações, a função da bomba é fornecer a energia ao líquido, para que possa ser realizado o trabalho de movê-lo, continuamente, do reservatório inferior até a saída do tubo de recalque, vencendo todas as resistências encontradas no caminho e lá chegando com a energia cinética ou vazão desejadas.

Figura 9: Instalações típicas de bombeamento



Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2012)

Definição das variáveis da Figura 9:

h_r = Altura geométrica de recalque, desnível entre a cota da descarga da instalação e o plano que passa pelo eixo central do rotor da bomba;

h_a = Altura geométrica de aspiração, desnível entre o nível de água do reservatório inferior e o plano que passa pelo eixo central do rotor da bomba.

A altura estática ou geométrica de elevação (h_g) caracteriza-se pela soma entre as alturas geométricas de recalque e aspiração.

2.3.1 Altura manométrica

A altura manométrica é definida por Gomes et al. Como a energia cedida pela bomba ao líquido na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado. Junto com a descarga, forma o par de grandezas dependentes mais importantes da bomba. Enquanto a vazão traduz a velocidade e a quantidade de fluido transportado, a altura manométrica indica a capacidade de vencer os obstáculos, desníveis e atritos além de possibilitar que no final o fluido disponha da energia remanescente - pressão e/ou energia cinética desejada. Pode ser determinada aplicando-se a equação da energia entre um ponto na superfície livre do reservatório inferior e a descarga da tubulação de recalque, resultando em:

$$H_m = h_g + \Delta H_a + \Delta H_r + \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Em que:

H_m = Altura manométrica (m);

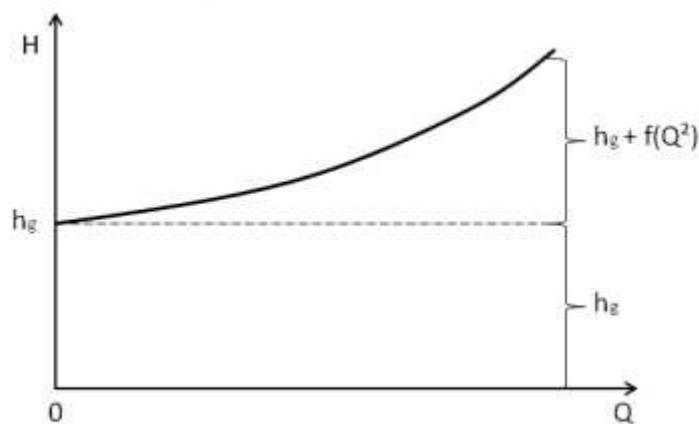
h_g = Altura estática (m);

ΔH_a = Perda de carga no trecho de aspiração (m);

ΔH_r = Perda de carga no trecho de recalque (m);

V = Velocidade na saída do recalque (m/s).

Figura 10: Curva do sistema



Fonte: Gomes et al. (2012)

2.3.2 Curvas características da bomba

À curva característica principal se junta a curva de rendimento, a de potência motriz e a do NPSH (Net Positive Suction Head) dando origem às curvas características da bomba. As curvas são obtidas pelo fabricante a partir de ensaios em laboratório.

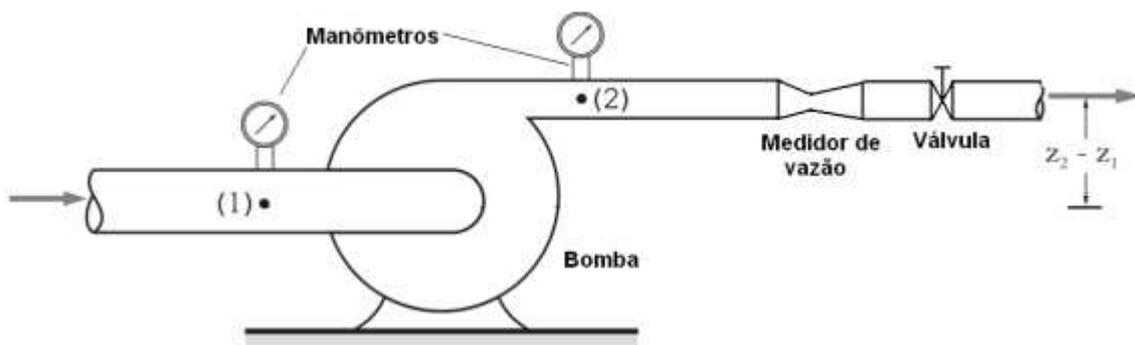
Todas as medições são realizadas para várias vazões, incluindo a vazão nula (shut off), de modo a obter uma curva única ou várias curvas de nível em função da vazão, onde é identificado o PME (Ponto de Máxima Eficiência).

No Brasil, os ensaios de bombas seguem a norma da *ABNT NBR 6397:1975 - Ensaios de bombas hidráulicas de fluxo*. Internacionalmente, são utilizadas normas do Hydraulic Institute ou da American Society of Mechanical Engineers - ASME dos EUA.

2.3.2.1 Curva característica principal

Para traçar a curva característica principal $H_m \times Q$, a altura manométrica é calculada aplicando-se Bernoulli generalizado (Equação 6), entre um ponto na entrada da bomba (1), e na sua saída (2).

Figura 11: Instalação utilizada em ensaios de bombas



Fonte: Gomes et al. (2012)

As medições são realizadas para várias vazões, incluindo a vazão nula (shut off), primeiro ponto da curva. A variação de vazão é comumente realizada controlando-se a abertura de uma válvula instalada na descarga, a jusante da seção 2.

2.3.2.2 Potência motriz

Esta pode ser determinada medindo-se o torque de acionamento, (T), acionando a bomba com um motor pêndulo (cuja carcaça permite a determinação do seu conjugado de reação) ou utilizando um torquímetro no seu eixo. Em ambos os casos, fazem-se necessário à medição da velocidade de rotação, (N), através de um tacômetro. A potência motriz, (P_m), é obtida pelo produto do conjugado pela velocidade angular, conforme Equação 18.

$$P_m = \frac{2\pi NT}{60} \quad (18)$$

Gomes et al. complementa que alternativamente, quando se aciona a bomba por um motor elétrico cuja curva de rendimento é conhecida, a potência motriz pode ser determinada indiretamente através da medição da potência elétrica, (P_e), que o alimenta. Para isso, utiliza-se um wattímetro que fornece o valor da potência elétrica diretamente, ou na ausência deste, mede-se a tensão entre as fases, (V), através de um voltímetro e a corrente nelas, (I), por meio de amperímetros, e assim, para um motor trifásico, calcula-se a potência motriz através da Equação 19:

$$P_m = \eta_{me} P_e = \eta_{me} VI\sqrt{3} \cos \varphi \quad (19)$$

Em que:

P_e = Potência elétrica (W);

η_{me} = Rendimento do moto elétrico;

$\cos \varphi$ = Fator de potência.

Os fabricantes no Brasil fornecem a potência motriz e as curvas.

2.3.2.3 Curva de rendimento

Rendimento da bomba, Equação 21, é o quociente entre a potência fornecida ao fluido pela bomba, denominado potência hidráulica, (P_{hid}), pela potência motriz, (P_m), e pode ser determinado após a medição da potência motriz no eixo da bomba.

Segundo Gomes et al. (2012) potência hidráulica, Equação 20, é a altura manométrica (H_m), expressa na forma de potência (energia/tempo) sendo obtida ao multiplicar a altura manométrica pela vazão gravimétrica (peso/tempo).

$$P_{hid} = H_m \gamma Q \quad (20)$$

$$\eta = \frac{P_{hid}}{P_m} = \frac{\gamma^* QH}{Pm^*} = \frac{\gamma^{**} QH}{75 Pm^{**}} \quad (21)$$

Em que:

γ^* = Peso específico do fluido (N/m³);

γ^{**} = Peso específico do fluido (Kgf/m³);

Pm^* = Potência motriz (W);

Pm^{**} = Potência motriz (cv).

O rendimento do conjunto motobomba, (η_{mb}), é determinado pelo quociente da potência hidráulica, (P_{hid}), pela potência elétrica, (P_e).

$$\eta_{mb} = \frac{P_{hid}}{P_e} \quad (22)$$

2.3.2.5 Potência do conjunto motobomba

Esta é o quociente entre a potência hidráulica, (P_{hid}), e o rendimento do conjunto motobomba, (η_{mb}), conforme Equação 23.

$$P = \frac{P_{hid}}{\eta_{mb}} \quad (23)$$

2.3.2.6 Curva de NPSH

O NPSH, ou Net Positive Suction Head, representa a diferença entre a carga de pressão total disponível na instalação (estática e dinâmica) e a pressão de vapor do líquido. Trata-se de uma característica da instalação e não da bomba, sendo por isso referenciado como NPSH disponível (NPSH_d). Em instalações cuja configuração é *aspirada*, considera-se a Equação 24, para configurações *afogadas*, a 25.

$$\text{NPSHd} = \frac{p_0}{\gamma} - h_a - \Delta h_a - \frac{p_v}{\gamma} \quad (24)$$

$$\text{NPSHd} = \frac{p_0}{\gamma} + h_a - \Delta h_a - \frac{p_v}{\gamma} \quad (25)$$

Em que:

$\frac{p_0}{\gamma}$ = Pressão na superfície do fluido (m);

h_a = Altura geométrica de aspiração (m);

Δh_a = Perda de carga na aspiração (m);

$\frac{p_v}{\gamma}$ = Pressão absoluta de vapor do fluido (m).

A pressão na superfície do fluido pode ser expressa em termo de pressão atmosférica, medida pela primeira vez pelo físico italiano Evangelista Torricelli. Para tanto, **Torricelli** fez uso de uma bacia e uma coluna de vidro, ambas cheias de mercúrio. Entornando o conteúdo da coluna de vidro na bacia, ele deixou o mercúrio escorrer para o recipiente até que o nível dessa substância no interior do tubo de vidro deixasse de abaixar. Com isso ele concluiu que a pressão da atmosfera era correspondente à pressão exercida pela coluna de mercúrio, que tinha, aproximadamente, 760 mm de altura. Podemos utilizar a Equação 26 para o cálculo da pressão atmosférica, em função da altitude do local.

$$P_{\text{atm}} = \frac{(760 - 0,081Z)13,6}{1000} \quad (26)$$

Em que:

P_{atm} = Pressão atmosférica (mca);

Z = Altitude do local, em relação ao nível do mar.

Para chegar ao rotor e percorrer os canais entre as pás, o líquido sofre perdas de carga que reduzirão sua pressão. Estas perdas e, conseqüentemente, a pressão disponível, são dependentes do projeto da bomba e não da instalação. Para garantir que essa pressão se mantenha superior à de vapor, é conveniente que se defina um outro NPSH, característico da bomba. Este é identificado como NPSH requerido (NPSHr). Para que a bomba não cavite, faz-se necessário que a instalação disponha de um NPSH superior ao exigido pela bomba. Alguns autores recomendam que a diferença seja de 1 m, outros indicam uma margem 20% de segurança. Naturalmente, devem prevalecer as recomendações do fabricante. O NPSHr é geralmente fornecido pelo fabricante na forma de gráficos em função da vazão e integrados às curvas características da bomba.

As conseqüências que acarretam o fenômeno de cavitação são: danos ao material das paredes sólidas próximas às implosões, peças com aspecto poroso, barulhos, vibrações, e alteração nas curvas características do conjunto motobomba.

Na ausência da curva de NPSHr fornecida pelo fabricante, pode-se estimá-lo através do coeficiente de cavitação ou de Thoma, σ :

$$\sigma = k\sigma \cdot N_q \quad (27)$$

Em que:

$K\sigma$ = Coeficiente empírico (Tabela 3);

N_q = Rotação específica.

Tabela 3: Valores de $k\sigma$ em função do tipo de bomba

Tipo	$k\sigma$
Centrífuga sucção simples	0,0011
Centrífuga sucção dupla	0,0007
Helicoidal	0,0013
Axial	0,0014

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2012)

N_q pode ser entendida, segundo Gomes et al., como a velocidade com que a bomba unidade ($H_m = 1$ m e $Q = 1$ m³ /s) deve girar para que seja equivalente a uma bomba qualquer de grandezas Q_1 , H_1 e N_1 e pode ser expressa pela Equação 28.

$$N_q = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{Hm^{\frac{4}{3}}} \quad (28)$$

Em que:

N = Rotação da bomba (RPM);

H_m = Altura manométrica (m);

Q = Vazão (m³/s).

Na prática este método não é utilizado, pois obtém-se apenas um valor de referência para o NPSHr, consultando-se as curvas fornecidas pelos fabricantes pode-se obter indicações precisas para o NPSHr.

3. DESENVOLVIMENTO DA PLANILHA

A planilha foi construída utilizando 5 abas, para organização das etapas e conforto do usuário, são elas:

- a) Entrada;
- b) Perdas de carga;
- c) Caract. motobomba;
- d) Automação;
- e) Memorial.

A Figura 12 ilustra a aba inicial da planilha, denominada *Entrada*. Às células de *consumo diário da edificação*, *velocidade no ramal predial*, *tempo de funcionamento da bomba* e *material da tubulação* devem ser preenchidas para fornecer os primeiros resultados, que são os diâmetros de recalque e sucção.

Figura 12: Aba *Entrada* da planilha

CONSUMO DIÁRIO DA EDIFICAÇÃO (l)

VELOCIDADE NO RAMAL E ALIMENTADOR PREDIAL (m/s) **Recomenda-se velocidades entre 0,6 e 1,0m/s**

TEMPO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA (h)

MATERIAL DA TUBULAÇÃO

DIÂMETRO DE RECALQUE CALCULADO (mm)

DIÂMETRO DE SUÇÃO CALCULADO (mm)

INSERIR PERDAS DE CARGA

CONFIGURAÇÃO DA INSTALAÇÃO

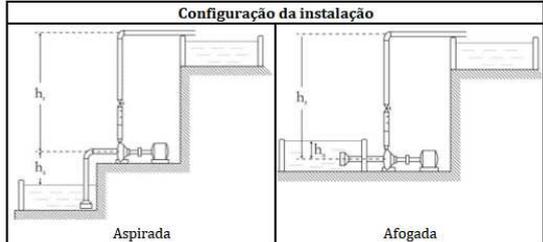
ALTURA GEOMÉTRICA DE ASPIRAÇÃO (ha) (m)

ALTURA GEOMÉTRICA DE RECALQUE (hr) (m)

INSERIR CARACT. HIDRÁULICAS DA BOMBA

REFINAMENTO DO GRÁFICO

PONTO DE OPERAÇÃO E RESULTADOS



Fonte: Autora

A *ABNT NBR 5626:2020 – Sistemas prediais de água fria e água quente*, determina que a vazão considerada no abastecimento do reservatório superior deve ser suficiente para a reposição do volume destinado ao consumo diário de água em até 6h.

Para o dimensionamento das linhas de recalque de bombas que funcionam apenas por algumas horas por dia Forchheimer propôs a Equação 30, adaptada da equação de Bresse. A vazão de projeto foi calculada conforme Equação 29, considerando o tempo de reposição de 6h, e substituída na Equação 30 a fim de determinar o diâmetro interno mínimo da tubulação de recalque.

$$QP = \frac{CD}{T} \quad (29)$$

$$D_{rec,min} = 1,3 \cdot \sqrt[4]{\frac{T}{86400}} \cdot \sqrt{QP} \quad (30)$$

Em que:

Q_P = Vazão de projeto ($m^3 \cdot s^{-1}$);

$D_{rec,min}$ = Diâmetro interno mínimo de recalque (m);

T = Tempo de funcionamento da bomba (s).

O próximo passo é a inserção das perdas de carga para as linhas de recalque e sucção, para isto basta clicar no botão *inserir perda de carga* e o usuário será direcionado a aba, *Perdas de carga*, para a inserção manual desses dados, ilustradas nas Figuras 13 e 14. A planilha utiliza o método dos comprimentos equivalentes, descrito no item 2.1.5 Perda de carga em condutos circulares.

As informações *Descrição*, *Diâmetro nominal*, *Rugosidade* e *Rugosidade relativa* são preenchidas automaticamente conforme dados inseridos na aba *Entrada*, basta que o usuário preencha os comprimentos reais do trecho de sucção e recalque, e quantidade e comprimento equivalente de cada singularidade.

Figura 13: Espaço destinado para a inserção das perdas de carga do trecho de recalque

RECALQUE				
Perdas de carga distribuída				
Descrição	Diâmetro nominal	Rugosidade (mm)	Rugosidade relativa	Comprimento (m)
Tubo quatern				
Comprimento real do trecho de recalque (L _{Recalque}) =				0,00
Perdas de carga localizadas - equivalência em metros de tubulação				
Quantidade	Singularidade			Comprimento equivalente (m)
Comprimento equivalente total do trecho de recalque (LEQ _{Recalque}) =				0,000

Fonte: Autora

Figura 14: Espaço destinado para a inserção das perdas de carga do trecho de sucção

SUÇÃO				
Perdas de carga distribuída				
Descrição	Diâmetro nominal	Rugosidade (mm)	Rugosidade relativa	Comprimento (m)
Tubo quatern				
Comprimento real do trecho de sucção (L _{Sucção}) =				0,000
Perdas de carga localizadas - equivalência em metros de tubulação				
Quantidade	Singularidade			Comprimento equivalente (m)
Comprimento equivalente total do trecho de sucção (LEQ _{Sucção}) =				0,00

Fonte: Autora

Para o cálculo das perdas de carga foi aplicada a equação de Darcy-Weisbach ou Universal (Equação 14), recomendada pela *NBR 5626: Sistemas prediais de água fria e água quente. Rio de Janeiro, 2020*.

O coeficiente adimensional (f) depende do nível de turbulência do escoamento (Re) e da rugosidade do material do conduto (E). O Número de Reynolds (Re) pode ser calculado segundo a Equação 1.

É comum utilizar, com erros aceitáveis, a equação de Swamee-Jain (Equação 31) para ordenar o valor de coeficiente de atrito (f), válida para diâmetros internos maiores que 10^{-6} m, menores que 10^{-2} m e Números de Reynolds compreendidos entre 10^3 e 10^8 .

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{E}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)\right]^2} \quad (31)$$

Após o fornecimento das informações de perda de carga distribuída e localizada o usuário pode clicar no botão *Ok* e será redirecionado para aba inicial, *Entrada*.

O usuário poderá optar entre as instalações Suction lift, quando a bomba é instalada num plano acima do nível de água do reservatório inferior, e Suction head, quando instalada abaixo do nível de água, ou seja, afogada, como discutido no item 2.3 *Energia cedida ao líquido, potência, rendimento e cavitação*. As alturas geométricas de aspiração (ha) e recalque (hr) deverão ser preenchidas, respectivamente. Neste ponto a planilha terá dados suficientes para aplicar o princípio de Bernoulli entre os reservatórios, inferior e superior, e fornecer ao usuário o par de grandezas dependentes para escolha da bomba, vazão de projeto e altura manométrica do sistema.

Encontrado o par de grandezas dependentes mais importantes para a seleção da bomba é possível alimentar a aba *Caract. motobombas*, a partir de catálogo de fabricantes, com a curva manométrica de um modelo de bomba que passará por verificações até ser definido. Para auxiliar o usuário foram disponibilizados dois catálogos de fabricantes usualmente utilizados no Brasil, Schneider e Famac.

Figura 15: Aba para inserção das características hidráulicas do motobomba

Par de grandezas dependentes para a escolha da bomba		Catálogos de fabricantes sugeridos	
Vazão de projeto (m ³ /h)	Altura manométrica (m)	SCHNEIDER	FAMAC
Fabricante			
Modelo			
Potência (cv)			
Temperatura da água (°C)			
Altitude (m)			
Características hidráulicas			
<input type="button" value="CALCULAR VAZÃO DE OPERAÇÃO"/>			
Vazão de operação para estimar o rendimento da bomba			
Vazão de operação (m ³ /h)	Rendimento (%)		
<input type="button" value="OK"/>			

Fonte: Autora

Após o fornecimento das características hidráulicas do motobomba, temperatura da água e altitude do local de instalação do sistema, em relação ao nível do mar, será apresentado ao usuário a vazão de operação após o acionamento do botão, podendo informar o rendimento do motobomba selecionado, conforme catálogo.

O usuário será redirecionado novamente a aba inicial, ao clicar no botão *Ok* onde poderá definir o intervalo de refinamento do gráfico, visando atender graficamente diversas curvas de sistemas e bombas. Enfim é possível gerar o memorial descritivo da bomba ao clicar no botão *Ponto de operação e resultados*, o modelo de memorial exportado pode ser consultado no Apêndice C.

Figura 16: QrCode de acesso a planilha



Fonte: Autora

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para fins de exemplificação a planilha foi alimentada com dados de um projeto existente elaborado durante a disciplina de estágio obrigatório da autora. O empreendimento é um edifício multifamiliar vertical de 23 pavimentos situado em Uberlândia, triângulo mineiro.

Para o cálculo da população ocupante foi considerado 2 pessoas por dormitório e 1 pessoa a cada 7m² para o coworking, utilizando a Tabela 4 como referência. Ao todo estimou-se a ocupação em 442 unidades atendidas.

Tabela 4: Taxa de ocupação de acordo com a natureza do local

Local	Taxa de ocupação
Residências e apartamentos	Duas pessoas por dormitório
Bancos	1 habitante/ 5,0 m ² de área
Escritórios	1 habitante/ 6,0 m ² de área
Lojas – pavimentos térreos	1 habitante/ 2,5 m ² de área
Lojas – pavimento superior	1 habitante/ 5,0 m ² de área
Shopping center	1 habitante/ 5,0 m ² de área
Museus e bibliotecas	1 habitante/ 5,5 m ² de área
Salões de hotéis	1 habitante/ 5,5 m ² de área
Restaurantes	1 habitante/ 1,4 m ² de área
Teatros, cinemas e auditórios	1 cadeira/ 0,7 m ² de área

Fonte: Adaptado de Júnior, 2014

Tabela 5: Discriminação do número de unidades atendidas

Pavimento	Natureza do local	Taxa de ocupação	Quantidade de locais	Unidades atendidas
1º ao 10º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	12 dormitórios	240
11º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
11º	Prédio de escritório (Único locatário)	1 pessoa / 6 m ² de área	22,45 m ²	4
12º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
13º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
14º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
15º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
16º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
17º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	9 dormitórios	18
18º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	6 dormitórios	12
19º ao 23º	Apartamento	2 pessoas/dormitório	6 dormitórios	60
Total de unidades atendidas =				442

Fonte: Autora

A exigência da concessionária do município o consumo per capita adotado foi de 200 l.unidades atendidas⁻¹.dia⁻¹, ao multiplicar o número de unidades atendidas pelo consumo diário per capita foi possível obter o consumo diário da edificação (CD), conforme Equação 32.

$$CD = N^{\circ} \text{ unidades atendidas} \times \text{Consumo per capita (l)} \quad (32)$$

$$CD = 442 \times 200 = 88.400 \text{ l.dia}^{-1}$$

Figura 17: Dados do empreendimento na aba *Entrada*

CONSUMO DIÁRIO DA EDIFICAÇÃO (l)
 VELOCIDADE NO RAMAL E ALIMENTADOR PREDIAL (m/s)
 TEMPO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA (h)
 MATERIAL DA TUBULAÇÃO
 DIÂMETRO DE RECALQUE CALCULADO (mm)
 DIÂMETRO DE SUÇÃO CALCULADO (mm)

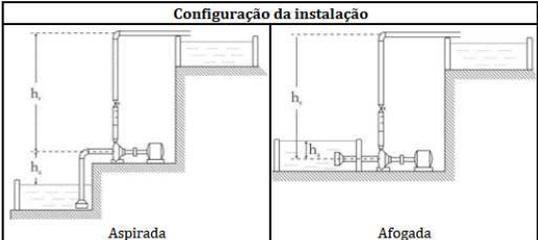
INSERIR PERDAS DE CARGA

CONFIGURAÇÃO DA INSTALAÇÃO
 ALTURA GEOMÉTRICA DE ASPIRAÇÃO (ha) (m)
 ALTURA GEOMÉTRICA DE RECALQUE (hr) (m)

INSERIR CARACT. HIDRÁULICAS DA BOMBA

REFINAMENTO DO GRÁFICO

PONTO DE OPERAÇÃO E RESULTADOS



Fonte: Autora

As perdas de carga foram inseridas manualmente conforme comprimentos reais e comprimentos equivalentes das singularidades, utilizando o plugin *DariaBIM* como fonte. O plugin é hospedado no software *Revit*.

Figura 18: Perdas de carga no trecho de recalque

RECALQUE						
Perdas de carga distribuída						
Descrição	Diâmetro nominal	Rugosidade (mm)	Rugosidade relativa			Comprimento (m)
Tubo quatherm	73	0,015	0,250417362			124,96
Comprimento real do trecho de recalque (LR _{recalque}) =						124,96
Perdas de carga localizadas - equivalência em metros de tubulação						
Quantidade	Singularidade					Comprimento equivalente (m)
1	Buchas de Redução Aquatherm® 73x54mm					0,700
4	Conector Aquatherm® 73mm x 75mm					0,100
1	União Aquatherm® 73mm					0,100
1	Junta de expansão dupla 75mm					1,875
1	Válvula de retenção vertical 75mm					8,100
1	Válvula de esfera 75mm					0,400
10	Joelho 90° Aquatherm® 73mm					3,900
36	Luva Aquatherm® 73mm					0,100
2	Tê Aquatherm® 73mm					8,000
Comprimento equivalente total do trecho de recalque (LEQ _{recalque}) =						70,175

Fonte: Autora

Figura 19: Perdas de carga no trecho de sucção

SUCÇÃO				
Perdas de carga distribuída				
Descrição	Diâmetro nominal	Rugosidade (mm)	Rugosidade relativa	Comprimento (m)
Tubo quatherm	89	0,015	0,206043956	1,76
Comprimento real do trecho de sucção (LR _{sucção}) =				1,760
Perdas de carga localizadas - equivalência em metros de tubulação				
Quantidade	Singularidade			Comprimento equivalente (m)
1	Válvula de pé com crivo			9,000
1	Buchsa de Redução Aquatherm® 89x54mm, CPVC, Água Quente - TIGRE			0,800
1	Conector Aquatherm® 89 x 3", CPVC, Água Quente - TIGRE			0,100
2	Tê Aquatherm® 89mm, CPVC, Água Quente - TIGRE			8,150
1	Válvula de esfera 75mm			0,400
1	União Aquatherm® 89mm, CPVC, Água Quente - TIGRE			0,100
Comprimento equivalente total do trecho de sucção (LEQ _{sucção}) =				26,70

Fonte: Autora

Após a inserção das perdas de carga o usuário é levado a aba inicial *Entrada*, conforme Figura 17, para fornecimento das alturas geométricas de aspiração, recalque e configuração da instalação, afogada.

Na aba *Caract. motobomba* o par de grandezas dependentes, vazão de projeto e altura manométrica, é apresentado ao usuário, permitindo a seleção do conjunto motobomba no catálogo de fabricantes. Na planilha é apresentado como sugestão dois deles, Schneider e Famac, para o exemplo foi selecionado o modelo ME 24150 da Schneider.

Após a pré-seleção manual do modelo, utilizando os catálogos como fonte, é possível completar manualmente o preenchimento da aba com as informações de potência do modelo, em cavalos ou watts, temperatura da água, altitude do local e características hidráulicas do modelo.

Figura 20: Características hidráulicas do modelo ME 24150 da Schneider

Par de grandezas dependentes para a escolha da bomba		Catálogos de fabricantes sugeridos																
Vazão de projeto (m³/h)	Altura manométrica (m)	SCHNEIDER	FAMAC															
14,73333333	92,74																	
Fabricante Schneider																		
Modelo ME 24150																		
Potência 15 (cv)																		
Temperatura da água 20 (°C)																		
Altitude 863 (m)																		
Características hidráulicas																		
26,10	25,50	24,90	24,30	23,70	22,40	21,70	21,00	20,30	19,50	18,70	17,90	17,00	16,10	15,10	14,10	12,90	11,70	10,30
45,00	50,00	55,00	60,00	65,00	70,00	75,00	80,00	85,00	90,00	95,00	100,00	105,00	110,00	115,00	120,00	125,00	130,00	135,00
CALCULAR VAZÃO DE OPERAÇÃO																		
Vazão de operação para estimar o rendimento da bomba																		
Vazão de operação (m³/h)	Rendimento (%)																	
17,93412279	54,00																	
OK																		

Fonte: Autora

A bomba ME 24150 possui 15cv de potência, a temperatura selecionada foi de 20°C e altitude do município de Uberlândia em relação ao nível do mar é de 863. Com todos esses campos preenchidas foi encontrada a vazão de operação ao clicar no botão *Calcular vazão de operação*. Essa é a vazão efetivamente bombeada pelo conjunto na instalação projetada, com esse valor é possível selecionar visualmente através das curvas fornecidas pelo fabricante o rendimento, 54%, para que os cálculos de potência de operação, item 2.3.2.5 *Potência do conjunto*

motobomba, e NPSHd, item 2.3.2.6 Curva de NPSH, sejam realizados, conforme Figura 21 e apresentados no memorial descritivo da bomba (Apêndice C).

Figura 21: Potência e NPSHd na aba Automação da planilha

Potência	
Peso específico da água (N/m^3)	= 9792,3
Potência hidráulica (W)	= 4853,4
Potência de operação (W)	= 8987,7
Potência de operação (cv)	= 12,22
NPSH Disponível	
Patm (mca)	= 9,3853
NPSHd (m)	= 8,86
Coefficiente de segurança	= 0,2
NPSHd (m)	= 7,26

Fonte: Autora

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso, procurou-se divulgar de maneira simples e direta os conceitos básicos de mecânica dos fluidos e hidráulica aplicados a condutos forçados em regime permanente, restringindo-se a instalações de recalque de água. A revisão bibliográfica desenvolvida no trabalho foi traduzida através de fórmulas e códigos para uma linguagem de automação e programação simples e de amplo acesso, uma vez que o Microsoft Excel® é o software de planilha eletrônica mais utilizados no mundo.

É importante frisar que a planilha aqui desenvolvida, foi apenas para fins educacionais com o intuito de auxiliar o estudante em seus estudos para compreender entender a complexidade de um sistema elevatório de água, seguindo uma metodologia consagrada em manuais de hidráulica e ainda expor a importância do dimensionamento correto do sistema de bombas. Pois, uma má configuração na instalação ou errônea escolha de bomba hidráulica pode acarretar um transporte ineficiente de fluido e gastos energéticos exacerbados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Sistemas prediais de água fria e água quente. Rio de Janeiro, 2020.

AZEVEDO, J. M. N. et al. Manual de Hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1998.

BAPTISTA, M. B. Fundamentos de engenharia hidráulica. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

BRUNETTI, Franco. Mecânica dos fluidos. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

FAMAC: Catálogo técnico. Disponível em: <<https://www.famac.ind.br/catalogo-de-produtos/t>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

GOMES, H. P; CARVALHO, P. S. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa: Editora universitária - UFPB, 2012.

JUNIOR, R.C. **Instalações hidráulicas e o projeto de arquitetura**. São Paulo: BLUCHER, 2008.

PORTO, R. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.

SCHNEIDER: Catálogo técnico. Disponível em: <<https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

SILVA, Bruno Aguiar. **Investigação do comportamento dinâmico de bombas centrífugas**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

TIGRE. AQUATHERM: Catálogo técnico. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/catalogos-tecnicos>>. Acesso em: 8 dez. de 2022.

TIGRE. SOLDÁVEL: Catálogo técnico. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/catalogos-tecnicos>>. Acesso em: 8 dez. de 2022.

APÊNDICE A – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA AUTOMAÇÃO DA PLANILHA

Abaixo estão representadas as tabelas de matérias com seus respectivos diâmetros comerciais, que foram utilizados como base de dados para o cálculo dos diâmetros de sucção e recalque.

Tabela A. 1: Dimensões tubos linha Aquatherm - Tigre

Diâmetro nominal	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro interno (mm)
15	15,9	1,8	12,3
22	22,2	2,1	18
28	28,6	2,6	23,4
35	34,9	3,2	28,5
42	21,3	3,8	13,7
54	54	4,9	44,2
73	73,1	6,6	59,9
89	89	8,1	72,8
114	114,4	10,4	93,6

Fonte: Adaptado de Tigre

Tabela A. 2: Dimensões tubos linha Soldável - Tigre

Diâmetro nominal	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro interno (mm)
20	20	1,5	17
25	25	1,7	21,6
32	32	2,1	27,8
40	40	2,4	35,2
50	50	3	44
60	60	3,3	53,4
75	75	4,2	66,6
85	85	4,7	75,6
110	110	6,1	97,8

Fonte: Adaptado de Tigre

A seguir a tabela de propriedades físicas da água utilizada para o cálculo automático do peso específico da água, dado necessário para o cálculo da potência hidráulica (P_{hid}), utilizando a temperatura como dado de entrada.

Tabela A. 3: Propriedades físicas da água

Temperatura (°C)	Massa específica ρ (Kg/m ³)	Viscosidade μ (Kg/ms)	Visc. Cinemática ν (m ² /s)	Pressão de vapor p_v (Kpa)	(m)
0	999,8	0,00178	1,8E-06	0,66	0,07
4	1000,0	0,00156	1,6E-06	-	-
5	1000,0	0,00152	1,5E-06	0,87	0,09
10	999,7	0,00131	1,3E-06	1,23	0,13
15	999,1	0,00114	1,1E-06	1,71	0,17
20	998,2	0,00101	1,0E-06	2,34	0,24
25	997,0	0,00090	9,0E-07	3,17	0,32
30	995,7	0,00081	8,1E-07	4,25	0,43
40	992,2	0,00066	6,6E-07	7,38	0,75
50	988,0	0,00055	5,6E-07	12,4	1,26
60	983,2	0,00047	4,7E-07	19,9	2,03
70	977,8	0,00040	4,1E-07	31,2	3,18
80	971,8	0,00035	3,6E-07	47,4	4,83
90	965,3	0,00031	3,2E-07	70,1	7,15
100	958,4	0,00027	2,8E-07	101	10,30

Fonte: Adaptado de Gomes et al.

APÊNDICE B – PRINCIPAL CÓDIGO DA PLANILHA ELETRÔNICA

Código VBA para aplicação do método iterativo no cálculo da vazão de operação e exportação do memorial em pdf.

```

Sub Resultados()

Dim FldrPicker As FileDialog
Dim myFolder As String

Set FldrPicker = Application.FileDialog(msoFileDialogFolderPicker)

With FldrPicker
.Title = "Select A Target Folder"
.AllowMultiSelect = False
If .Show <> -1 Then Exit Sub
myFolder = .SelectedItems(1) & "\"
End With

'
' Resultados Macro
'
'
Sheets("Automação").Select
Range("C77").Select
Application.CutCopyMode = False
Application.CutCopyMode = False
Application.CutCopyMode = False
Range("C77").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("C76")
Sheets("Memorial").Select
Range("A1:I44").Select
ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, Filename:= _
myFolder & "\Memorial descritivo da bomba.pdf" _
, Quality:=xlQualityStandard, IncludeDocProperties:=True, IgnorePrintAreas _
:=False, OpenAfterPublish:=True
ActiveWindow.SmallScroll Down:=0
Sheets("Automação").Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-45
Sheets("Entrada").Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=0
Sheets("Automação").Select
Range("E29").Select
ActiveSheet.Protect DrawingObjects:=True, Contents:=True, Scenarios:=True
Application.Goto Reference:="Resultados"

ActiveWindow.SmallScroll Down:=-10
Application.WindowState = xlMinimized
Application.WindowState = xlNormal
ActiveWindow.SmallScroll Down:=16
Sheets("Memorial").Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=0

End Sub

```

MEMORIAL DESCRITIVO DA BOMBA

Data de emissão: 07/02/2023



Modelo da bomba
ME 24150

Catálogo
Schneider
motobombas

INFORMAÇÕES

Consumo diário:	88,4 m ³	Linha Aquatherm - Tigre (CPVC)
Configuração da instalação:	Afogada	Diâmetro de recalque: 73 mm
		Diâmetro de sucção: 89 mm

CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO

Vazão máxima:	26,1 m ³ /h
Potência máxima:	15,0 CV
Vazão de operação:	17,93 m ³ /h
Potência de operação:	12,22 CV
Hm de operação:	99,49 m

CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO

Líquido:	Água
Temperatura:	20 °C
Vazão de projeto:	14,73 m ³ /h
Perda de carga:	8,26 m
NPSHd:	7,26 m

