

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE MEMORIAL DE CÁLCULO DA INSTALAÇÃO DE  
CONJUNTO DE BOMBAS ANFÍBIAS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA.**

**THEÓFILO GUERRA COSTA SILVA**

**UBERLÂNDIA – MG**

**2021**

**THEÓFILO GUERRA COSTA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE MEMORIAL DE CÁLCULO DA INSTALAÇÃO DE  
CONJUNTO DE BOMBAS ANFÍBIAS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA.**

**Trabalho de Conclusão de Curso** apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
BACHAREL em **ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: máquinas de fluxo e  
sistemas hidráulicos.

**Orientador:** Prof. Dr. Valério Luiz Borges

**UBERLÂNDIA – MG**

**2021**

**THEÓFILO GUERRA COSTA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE MEMORIAL DE CÁLCULO DA INSTALAÇÃO DE  
CONJUNTO DE BOMBAS ANFÍBIAS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de BACHAREL em ENGENHARIA MECÂNICA.

**Uberlândia, 28 de maio de 2021**

**COMISSÃO AVALIADORA**

---

Dr. Edson Alves Figueira Jr.

---

Dr. José Sílvio Pessoa Filho

---

Dr. Valério Luiz Borges

## RESUMO

O Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) é responsável pelo abastecimento de água potável para a cidade de Uberlândia-MG. A Estação de Tratamento de Água (ETA) Sucupira conta com um projeto que consta a instalação de três bombas anfíbias com a finalidade de tratar 2000 litros d'água por segundo, ao invés de 1600 litros por segundo do sistema atual. Este projeto também solucionará problemas devido ao baixo nível de água nos períodos de seca e reduzirá a potência de bombeamento da água. Como parte do projeto, foi realizado um comissionamento da instalação, desenvolveu uma modelagem matemática através do software Engineering Equation Solver, fornecendo um memorial de cálculo hidráulico da nova instalação como comprovação do objetivo previsto. Com isso, tornou-se possível a obtenção de resultados de vazão em diferentes acionamentos das bombas, bem como da perda de carga nos elementos presentes, registrando dados para auxiliar em futuros problemas, ampliações e melhorias.

**Palavras-chave:** Bomba centrífuga, conduto forçado, memorial de cálculo.

## ABSTRACT

The Municipal Department of Water and Sewage (DMAE) is responsible for supplying drinking water to the city of Uberlândia-MG. The Sucupira Water Treatment Station (ETA) has a project that includes the installation of three amphibious pumps with the purpose of treating 2000 liters of water per second, instead of 1600 liters per second in the current system. This project will also solve problems due to the low water level in dry periods and will reduce the water pumping power. As part of the project, a commissioning of the installation was carried out, a mathematical modeling was developed using the Engineering Equation Solver software, providing a hydraulic calculation memorial for the new installation as proof of the expected objective. With this, it became possible to obtain flow results in different pump activations, as well as the loss of head in the elements present, recording data to assist in future problems, expansions and improvements.

**Keywords:** Centrifugal pump, penstock, calculation report,

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
MG	Minas Gerais
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
L/s	Litro por segundo
m <sup>3</sup> /s	Metro cúbico por segundo
m <sup>3</sup> /h	Metro cúbico por hora
EES	Engineering Equation Solver
cv	Cavalo-vapor
$H_n$	Energia mecânica no referencial n-ésimo [m].
$P_n$	Pressão no referencial n-ésimo [N/m <sup>2</sup> ].
$\rho$	Densidade do fluido [kg/m <sup>3</sup> ].
$g$	Gravidade [m/s <sup>2</sup> ].
$\alpha$	Fator de correção de energia cinética, adimensional.
$V_n$	Velocidade média no referencial n-ésimo [m/s].
$Z_n$	Energia potencial no referencial n-ésimo [m].
$H_b$	Energia fornecida por bombas [m].
$H_p$	Perdas de carga na tubulação e acessórios [m].
$Q_n$	Vazão no referencial n-ésimo [m <sup>3</sup> /s].
$K_v$	Coefficiente de vazão, adimensional.
$p$	Ângulo de abertura em válvulas borboletas.
$f$	Fator de atrito, adimensional.

$L$	Comprimento da tubulação [m].
$D$	Diâmetro da tubulação [m].
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta da parede do tubo [m].
$\vartheta$	Viscosidade cinemática do fluido [m <sup>2</sup> /s].
mca	Metro por coluna d'água
kW	Kilowatt

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado do teste hidrostático das bombas. ....	34
Tabela 2 – Coeficiente de vazão em válvulas borboletas.....	37
Tabela 3 – Dados de projeto sobre as tubulações utilizadas. ....	41
Tabela 4 – Resultados da operação com uma bomba 150 cv.....	47
Tabela 5 - Resultados da operação de uma bomba 250 cv.....	47
Tabela 6 - Resultados da operação de duas bombas 150 cv.....	48
Tabela 7 - Resultados da operação de uma bomba 150 cv e uma bomba de 250 cv. ....	48
Tabela 8 - Resultados da operação de todas as bombas.....	49
Tabela 9 – Vazões finais em cada tipo de operação.....	49



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Trajetória do líquido no rotor da bomba centrífuga radial.....	17
Figura 2 - Diferenças construtivas nos rotores de bombas centrífugas e o sentido do fluido..	18
Figura 3 - Válvula de gaveta. ....	20
Figura 4- Válvula borboleta. ....	21
Figura 5 – Válvula de retenção tipo plugue ou disco.....	21
Figura 6 – Canal de captação da água bruta da ETA Sucupira. ....	23
Figura 7 – Instalação existente na Casa de Máquinas da ETA Sucupira. ....	24
Figura 8 – Conjunto do sistema hidráulico, acionamento por turbinas hidráulicas. ....	25
Figura 9 – Conjunto do sistema misto, acionamento por motor elétrico e turbina hidráulica. ....	25
Figura 10 – Conjunto do sistema elétrico, acionamento por motor elétrico. ....	26
Figura 11 – Ponto de chegada da água bruta para o tratamento, denominado Bolo de Noiva. ....	27
Figura 12 – Esboço da localização espacial das instalações. ....	29
Figura 13 – Vista perspectiva isométrica da instalação das bombas anfíbias.....	30
Figura 14 – Bombas anfíbias instaladas de acordo com projeto. ....	31
Figura 15 – Esboço simplificado da ampliação do sistema. ....	32
Figura 16 – Dados fornecidos pelo fabricante da perda de carga em função vazão do fluido em diferentes diâmetros de válvula de retenção de fechamento rápido.....	39
Figura 17 – Esboço geral da instalação. ....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas características das bombas, altura manométrica total (m) em função vazão ( $m^3/h$ ).....	35
Gráfico 2 – Curvas características das bombas, altura manométrica total (m) em função vazão ( $m^3/s$ ). ....	36
Gráfico 3 – Curvas do coeficiente de vazão em função do ângulo de abertura em válvulas borboletas. ....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVO.....	15
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	16
3.1. Classificação geral de máquinas hidráulicas .....	16
3.2. Classificação geral de bombas hidráulicas .....	16
3.2.1. Bomba centrífuga radial .....	17
3.2.2. Bomba centrífuga mista .....	17
3.2.3. Bomba axial.....	18
3.3. Associação de bombas.....	18
3.4. Válvulas .....	19
3.4.1. Válvulas de bloqueio .....	19
3.4.2. Válvulas de controle de fluxo.....	20
3.4.3. Válvulas de controle unidirecional.....	21
3.5. Concepção do projeto .....	22
4. INFRAESTRUTURA E OPERAÇÃO EXISTENTE.....	23
5. PROJETO E FUTURA OPERAÇÃO .....	28
6. METODOLOGIA .....	32
6.1. Carga fornecida pelas bombas .....	33

6.2.	Perda de carga em válvulas .....	36
6.3.	Perda de carga em tubos retos .....	39
6.4.	Perda de carga local em conexões .....	41
6.5.	Modelagem matemática no EES.....	41
7.	RESULTADOS.....	46
8.	CONCLUSÃO .....	51
9.	REFERÊNCIAS.....	52
10.	ANEXOS.....	53
10.1.	ANEXO A - Código EES com uma bomba 150 cv em operação.....	53
10.2.	ANEXO B - Código EES com uma bomba 250 cv em operação.....	56
10.3.	ANEXO C - Código EES com duas bombas 150 cv em operação .....	59
10.4.	ANEXO D - Código EES com uma bomba 150 cv e uma bomba 250 cv em operação. ....	62
10.5.	ANEXO E - Código EES com todas as bombas em operação. ....	65

## 1. INTRODUÇÃO

O Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) é o órgão responsável pelo abastecimento de água potável à população e indústrias, pelo tratamento do esgoto gerado e pela limpeza urbana de Uberlândia – MG. Dentre diversas instalações distribuídas pela cidade, o DMAE conta com 3 ETAs, que são: ETA Bom Jardim, ETA Sucupira e ETA Capim Branco, a última em fase de pré-operação. Com as 3 estações em operação, o DMAE visa garantir o abastecimento de água potável para cerca de 1,5 milhão de pessoas.

A ETA Sucupira foi inaugurada na década de 70, ocorrendo inúmeras ampliações e reformas na sua estrutura devido ao aumento populacional, com o objetivo de melhorar, com novas tecnologias e infraestrutura, o sistema de abastecimento à população e indústrias (Prefeitura de Uberlândia). Segundo informações do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, de 1980 a 2010 a população residente de Uberlândia cresceu em 250%, prevendo um aumento por volta de 100 mil habitantes para o ano de 2020, chegando a um total aproximado de 700 mil habitantes.

Ampliações geralmente apresentam uma grande importância e responsabilidade das pessoas envolvidas com habilidades técnicas e científicas, e com uma profunda gestão de prazos e operações, pois abrangem altos recursos financeiros e materiais, sendo que, um pequeno erro ou desatenção pode proporcionar grandes riscos, alterações e dificuldades na conclusão do objetivo, o que pode gerar custos financeiros indesejáveis e insatisfação dos stakeholders.

Em um projeto de engenharia é comumente encontrado desenhos técnicos, memoriais de cálculo e descritivo que tem por finalidade auxiliar no planejamento, compreensão e detecção de problemas ou erros na execução, o que facilita as alterações que forem necessárias no gerenciamento, assim, desempenham um papel fundamental durante todo o desenvolvimento do projeto.

Para o abastecimento de água potável para a população e para as indústrias, um memorial de cálculo hidráulico é necessário, sendo possível através de cálculos determinar se o bombeamento de água irá atender a demanda exigida, além de apresentar diversas informações de projetos como vazão em um determinado ponto, perda de carga em respectivo elemento, diâmetro e espessura das tubulações utilizada e entre outros, e oferece dados que irá auxiliar em futuras adaptações e afrontar possíveis causas e efeitos que venha a ocorrer.

Neste contexto, a instalação de bombas anfíbias na ETA Sucupira visa aumentar a capacidade máxima de tratamento de água de 1,6 m<sup>3</sup>/s para 2,0 m<sup>3</sup>/s, fazendo a substituição do sistema de captação da água bruta existente, além de, reduzir os custos de operação em épocas de pouca chuva. Com isso, um memorial de cálculo é utilizado como comprovação de que este projeto irá atingir os objetivos previstos, além de obter um valor aproximado da vazão, é possível realizar uma simulação da operação de diferentes bombas e registrar dados.

## **2. OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo realizar um comissionamento da instalação das bombas anfíbias, garantir que todos os componentes estejam instalados e projetados adequadamente, que irão operar de forma correta e satisfatória, e produzir um memorial de cálculo hidráulico do projeto. Através de uma modelagem matemática utilizando como auxílio o software de engenharia EES, é possível aproximar a vazão de água destinada ao tratamento, analisar diferentes situações de atuações das bombas, quantificar a perda de carga em elementos como tubulações e válvulas e registrar dados para auxiliar em futuras ampliações e melhorias.

### **3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### ***3.1. Classificação geral de máquinas hidráulicas***

Pode-se classificar as máquinas hidráulicas em três grandes grupos: máquinas motrizes, máquinas geratrizes e máquinas mistas.

O trabalho mecânico realizado pelas máquinas motrizes é originado através de uma energia hidráulica. Geralmente este tipo de máquina é utilizada para acionamento de outras máquinas, tal como geradores de energia elétrica e bombas centrífugas. Em turbinas hidráulicas, aproveitando o desnível entre dois pontos, a energia do escoamento da água em canais formados por pás curvas de um rotor provoca o movimento rotativo de um eixo móvel, caracterizando uma máquina motriz (MACINTYRE, 1987).

As máquinas mistas transformam a energia hidráulica do fluido em outra forma de energia hidráulica. Ejetores, carneiro hidráulico e bombas de emulsão de ar são alguns dispositivos classificados neste grupo (SANTOS, 2007).

As máquinas geratrizes transformam o trabalho mecânico fornecida por uma máquina motriz, em energia hidráulica, provoca um acréscimo de energia potencial de pressão e cinética ao fluido, faz com que o fluido se desloque por escoamento. As bombas hidráulicas realizam este tipo de serviço acionadas por motores elétricos (MACINTYRE, 1987).

#### ***3.2. Classificação geral de bombas hidráulicas***

As bombas podem ser classificadas quanto ao seu deslocamento: bombas de deslocamento positivo (volumétricas) e de deslocamento não positivo (dinâmicas).

As bombas volumétricas possuem um ou mais câmaras, onde um elemento móvel aumenta a pressão do fluido, ocasionando seu movimento. Em sistemas de bombeamento de água os mais comuns são as de êmbolo e as de diafragma (GOMES, 2012).

As bombas dinâmicas são caracterizadas pela presença de um rotor, elemento rotatório dotado de pás, que exerce forças ao fluido que lhe resultam uma aceleração, ou seja, uma energia cinética. O rotor pode ser fechado, semiaberto ou aberto e a intensidade das forças varia



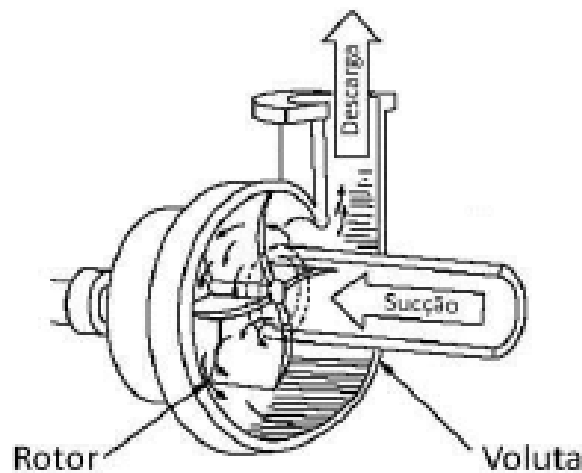
de acordo com o modelo construtivo de cada bomba. Alguns exemplos são a centrífuga radial, centrífuga mista e axial (GOMES, 2012).

Para a escolha da bomba, é necessário analisar o projeto quanto a carga manométrica e a vazão desejada, escolhendo aquela com o tipo de rotor que atenda estes dois requisitos de projeto.

### 3.2.1. Bomba centrífuga radial

A Figura 1 mostra a trajetória do fluido na bomba. O líquido entra axialmente no rotor, e ao passar pelos canais das pás, é expulso para a direção do raio devido a rotação. Assim toda a energia recebida pelo fluido é devida puramente às forças centrífugas. É recomendada nas instalações em que necessita de cargas manométricas mais significativas do que as vazões (SANTOS, 2007).

*Figura 1 – Trajetória do líquido no rotor da bomba centrífuga radial.*



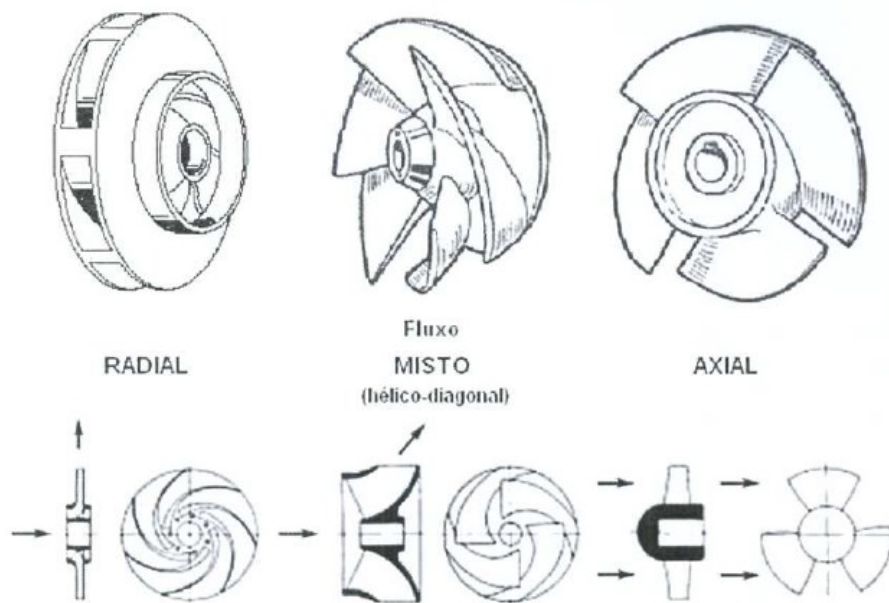
*Fonte: (GOMES, 2012).*

### 3.2.2. Bomba centrífuga mista

A trajetória do fluido é semelhante ao modelo anterior, sendo a diferença no modelo construtivo do rotor. Pelo fato de ser formado por pás de dupla curvatura, o líquido é lançado na saída do rotor com uma ligeira inclinação em relação ao eixo, com isso, parte da energia ao

fluido é devida a força centrífuga e parte devido à força de arrasto. Na Figura 2, observa-se a diferença entre os rotores e o sentido do fluido. Quanto maior a inclinação das pás, maior será a intensidade da força de arrasto (SANTOS, 2007).

Figura 2 - Diferenças construtivas nos rotores de bombas centrífugas e o sentido do fluido.



Fonte: (SANTOS, 2007).

### 3.2.3. Bomba axial

Nesta bomba o fluido entra axialmente e, ao passar pelo rotor, as trajetórias das partículas de fluido transformam-se em hélices cilíndricas até chegar a saída do conjunto, onde voltam a ser axiais. Na saída do rotor o escoamento é paralelo ao eixo. A energia transmitida ao fluido é puramente às forças de arrasto. Estas bombas são utilizadas quando o interesse em vazão é muito mais significativo do que em relação às cargas manométricas (SANTOS, 2007).

### 3.3. Associação de bombas

Quando se deseja aumentar a vazão ou a altura manométrica, as bombas podem ser associadas em série ou em paralelo. A associação de bombas em série é utilizada quando se deseja um ganho de carga manométrica, lembrando-se de verificar se a última bomba possui

resistência suficiente para suportar a pressão de associação. A associação em paralelo é utilizada quando se deseja o inverso, ou seja, um ganho de vazão (GOMES, 2012).

### **3.4. Válvulas**

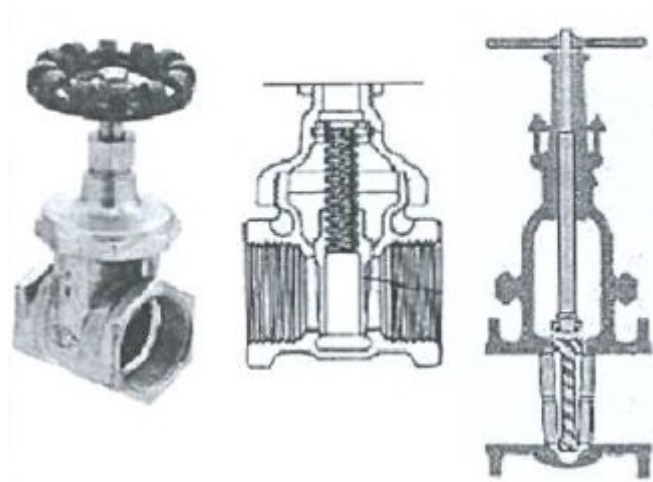
Destina-se a abrir, fechar e regular o deslocamento do fluido pelas tubulações. Existem vários tipos, sua posição de instalação e definição é em função da finalidade a qual é destinada. Uma instalação deve funcionar com o mínimo de válvulas que permita o seu funcionamento adequado. Seu acionamento pode ser do tipo manual ou automático, por motores elétricos, comando hidráulicos ou pneumáticos e ainda por efeito do próprio líquido. (NETTO et al., 1998).

#### **3.4.1. Válvulas de bloqueio**

Servem para interromper o fluxo em um determinado trecho da instalação. Comumente estão totalmente abertas, o que ocasiona poucas perdas de carga, e são fechadas apenas quando necessário, como em casos de manutenção. Exemplos: Válvula gaveta, válvula de esfera e válvula mangote (SANTOS, 2007).

A válvula gaveta é uma cunha ou gaveta que quando fechada, obstrui a passagem do fluido, e quando aberta, recolhe-se a uma campânula dando passagem total do fluido, conforme a Figura 3. Possui uma perda de carga muito pequena (NETTO et al., 1998).

*Figura 3 - Válvula de gaveta.*



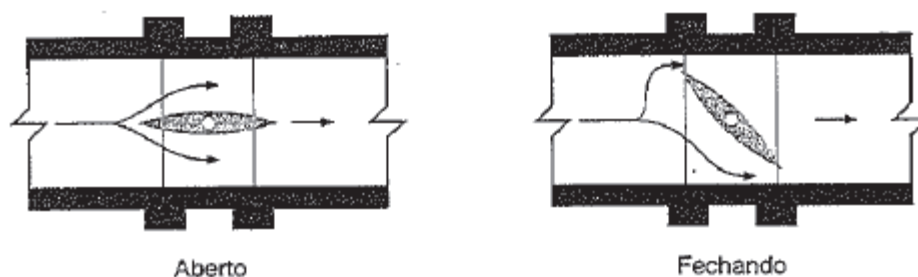
*Fonte: (SANTOS, 2007).*

#### 3.4.2. Válvulas de controle de fluxo

Têm por finalidade o controle do fluxo ou a regulação da vazão, por isso provocam uma grande perda de carga, mesmo que estejam totalmente abertas. Estas podem ser instaladas em qualquer posição quanto ao seu fechamento e em certos casos, podem operar como uma válvula de bloqueio. Válvulas do tipo borboleta, agulha, globo e diafragma são alguns exemplos de válvulas de controle de fluxo (SANTOS, 2007).

A válvula borboleta possui um disco preso a um eixo que atravessa a tubulação e quando movimentado, fecha a tubulação ou abre alinhando com o escoamento, observado na Figura 4. Este disco pode ser simétrico ou não em relação ao eixo. A grande vantagem da válvula borboleta é o equilíbrio em torno do eixo, pois a pressão atuante no disco que tende a fechar se anula com a pressão que tende a abrir, possibilitando um menor esforço externo para manobra. Outra vantagem é a facilidade na fabricação, tornando-se uma opção mais econômica (NETTO et al., 1998).

Figura 4- Válvula borboleta.



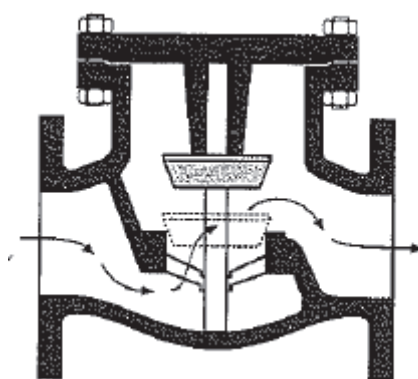
Fonte: (NETTO et al., 1998).

### 3.4.3. Válvulas de controle unidirecional

Estas permitem o deslocamento do fluido em um único sentido, assim o posicionamento na instalação é importante. Geralmente são instaladas em pontas de tubulações de sucção e saídas das bombas. O modelo construtivo permite o fechamento automático, sem necessidade de um volante. As válvulas de retenção fazem parte dessa categoria (SANTOS, 2007).

A Figura 5 mostra uma válvula de retenção tipo plugue ou disco. É uma válvula em que a haste não é roscada e o disco se movimentava subindo e descendo devido à pressão do líquido e por ação da gravidade ou mola (NETTO et al., 1998).

Figura 5 – Válvula de retenção tipo plugue ou disco.



Fonte: (NETTO et al., 1998).

### ***3.5. Concepção do projeto***

Inicia-se o pré comissionamento com a inspeção mecânica e funcional dos equipamentos utilizados que visa a conformidade das especificações técnicas e funcionamento. Em seguida, planeja-se as etapas de logística e montagem, o que assegura a identificação, a instalação e a proteção contra danos mecânicos e químicos para manter a integridade estrutural. Por fim, analisa-se os dados pertinentes ao projeto como elevação, diâmetro, comprimento e espessura da tubulação para garantir a operação de acordo com as necessidades.

#### 4. INFRAESTRUTURA E OPERAÇÃO EXISTENTE

A ETA Sucupira realiza a captação da água do Rio Uberabinha. Essa captação é feita através de um canal de alvenaria (Figura 6) contendo diversas comportas para controle do nível d'água, o que permite controlar a quantidade de água que entra e sai do canal, sendo diferente em determinadas épocas do ano devido ao volume das chuvas.

*Figura 6 – Canal de captação da água bruta da ETA Sucupira.*



*Fonte: Aatoria Própria*

A água captada é direcionada através de adutoras para a “Casa de Máquinas” (Figura 7), localizada a uma altitude inferior ao canal de captação, que tem a função de fornecer água para o tratamento e como fonte de alimentação para as turbinas hidráulicas existentes. As turbinas hidráulicas são responsáveis por transformar a energia hidráulica em energia mecânica, isso possui uma grande importância na operação por não consumir parte da energia elétrica durante o ano, que gera uma economia anual. Atualmente a casa de máquinas é composta por dois sistemas hidráulico, dois sistemas misto e cinco sistemas elétrico.

*Figura 7 – Instalação existente na Casa de Máquinas da ETA Sucupira.*



*Fonte: Autoria Própria*

Na Figura 8, observa-se o sistema hidráulico. É constituído por uma bomba IMBIL modelo ITAP 250-290 que destina a água para o tratamento, duas turbinas gêmeas tipo Francis com potência estimada de 250 cv cada e entre elas, outra bomba que envia a água potável para a cidade.



*Figura 8 – Conjunto do sistema hidráulico, acionamento por turbinas hidráulicas.*



*Fonte: Aatoria Própria*

Os sistemas mistos (Figura 9) são responsáveis apenas pelo bombeamento da água potável para a cidade. São compostos por motor WEG de 350 cv, bomba centrífuga radial e uma turbina gêmea tipo Francis com potência estimada de 250 cv.

*Figura 9 – Conjunto do sistema misto, acionamento por motor elétrico e turbina hidráulica.*



*Fonte: Aatoria Própria*

O sistema elétrico pode ser observado na Figura 10. Ao contrário do sistema misto, ele é responsável apenas pelo bombeamento da água para o tratamento. Possui diversas configurações de motobomba, utiliza bombas IMBIL modelos ITAP 250-290 e 250-330 e motores elétricos WEG que variam de 100 a 300 cv

*Figura 10 – Conjunto do sistema elétrico, acionamento por motor elétrico.*



*Fonte: Aatoria Própria*

A operação dos sistemas na casa de máquinas é variável durante o ano, considerando a demanda da população e o nível do rio. Em períodos chuvosos ocorre o aumento do nível do rio, conseqüentemente a quantidade de água disponível é maior, que viabiliza a utilização das turbinas hidráulicas, pois elas necessitam de um grande fluxo de água para seu funcionamento. Então, nesse período é utilizado preferencialmente o sistema hidráulico. Já em épocas de estiagem e calor intenso, caracterizado por uma diminuição do nível do rio, impossibilita a utilização das turbinas e aumenta a demanda da população por água potável, sendo necessário uma maior vazão de água bruta para tratamento, portanto, nessa situação, é utilizado os sistemas elétrico e misto.

Após a casa de máquinas, a água é bombeada através de duas adutoras distintas até o ponto inicial do tratamento, denominado como “Bolo de Noiva” (Figura 11), e a água que

funciona como acionamento das turbinas hidráulicas é retornada ao rio Uberabinha. O bolo de noiva é uma câmara de chegada feito por estruturas e chapas metálicas, que realiza a descarga da água por uma adutora central de diâmetro maior e por outras sete adutoras laterais de diâmetro menor. Sua configuração proporciona uma mistura rápida da água bruta com os produtos químicos utilizados no tratamento da água.

*Figura 11 – Ponto de chegada da água bruta para o tratamento, denominado Bolo de Noiva*



*Fonte: Aatoria Própria*

No bolo de noiva, inicia-se o tratamento. Atualmente, a capacidade máxima de tratamento de água é de 1,6 m<sup>3</sup>/s e para alcançar essa vazão, necessita de toda a potência elétrica de 1025 cv, ou seja, todos os sistemas elétricos ligados.

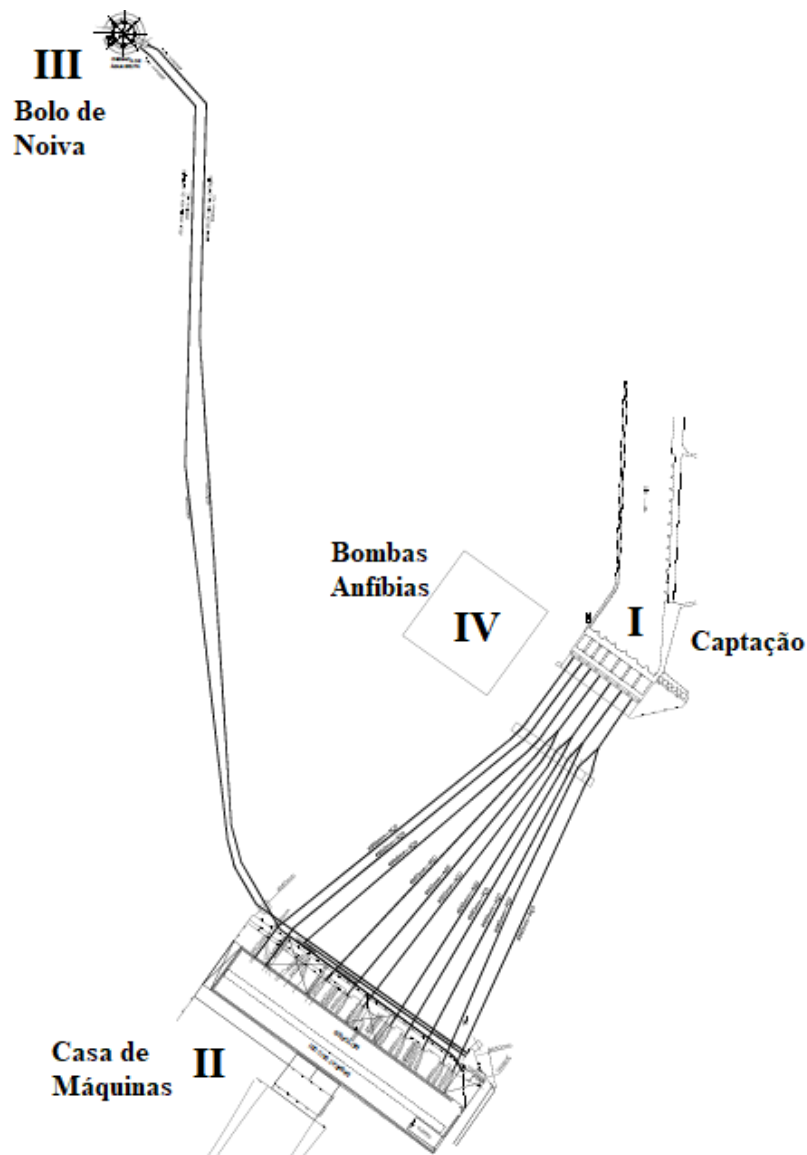
## 5. PROJETO E FUTURA OPERAÇÃO

Para realizar o aumento da vazão de tratamento, com a mesma infraestrutura e operação existente, seria necessário a adição de sistemas elétricos, o que acarretaria em um aumento do consumo de energia da operação, comprometendo os sistemas que utilizam turbinas hidráulicas com a escassez da água em determinadas épocas, além de ser inviável devido à falta de espaço físico na casa de máquinas.

Com o objetivo de atingir a capacidade máxima do tratamento de água de 2,0 m<sup>3</sup>/s e redução do consumo de energia elétrica na operação, instalou três bombas anfíbias do tipo centrífuga mista sendo duas bombas de 150 cv e uma bomba de 250 cv, com a finalidade de substituir os sistemas elétricos da casa de máquinas.

As bombas anfíbias estão localizadas em uma ramificação da adutora existente entre a captação e a casa de máquinas. A escolha desta localização levou-se em consideração a altura manométrica de recalque suportado pelas bombas e as especificações técnicas das bombas em relação ao nível da água na captação, com o intuito de manter as bombas sempre afogadas mesmo em épocas de estiagem. A figura 12 demonstra um esboço da localização das instalações para melhor compreensão, sendo (I) a captação, (II) a casa de máquinas, (III) o bolo de noiva e (IV) o local da instalação das bombas anfíbias.

Figura 12 – Esboço da localização espacial das instalações.



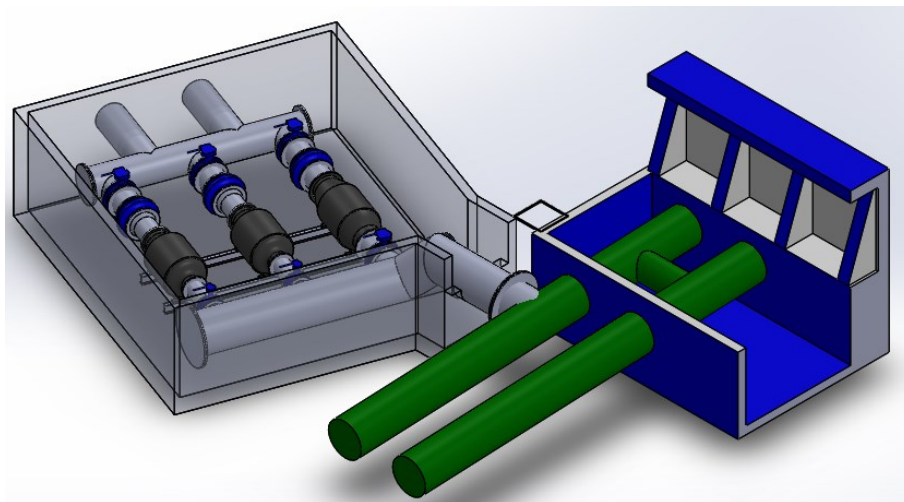
Fonte: Autoria Própria

A nova instalação é constituída de bombas, tubulações, acessórios, válvulas de retenção e válvulas borboletas, e oferece um outro caminho da água para o tratamento.

A sucção é realizada na adutora existente entre a captação e a casa de bombas, forma-se um barrilete em comum para todas as bombas. No recalque, a água bombeada é transportada através de duas adutoras que estão interligadas nas adutoras existentes entre a casa de bombas e o bolo de noiva. Fatores que influenciaram essa instalação foram: a menor variação de altitude entre o ponto de sucção e o ponto inicial do tratamento, o espaço físico existente e outras instalações presentes nas proximidades.

A figura 13 mostra o projeto na vista perspectiva isométrica da instalação das bombas, das válvulas e das ramificações, onde a parte em azul seria a alvenaria da captação e em verde a adutora existente que leva a água bruta para a casa de máquinas; e a figura 14 a instalação real dos componentes.

*Figura 13 – Vista perspectiva isométrica da instalação das bombas anfíbias.*



*Fonte: Autoria Própria*

*Figura 14 – Bombas anfíbias instaladas de acordo com projeto.*

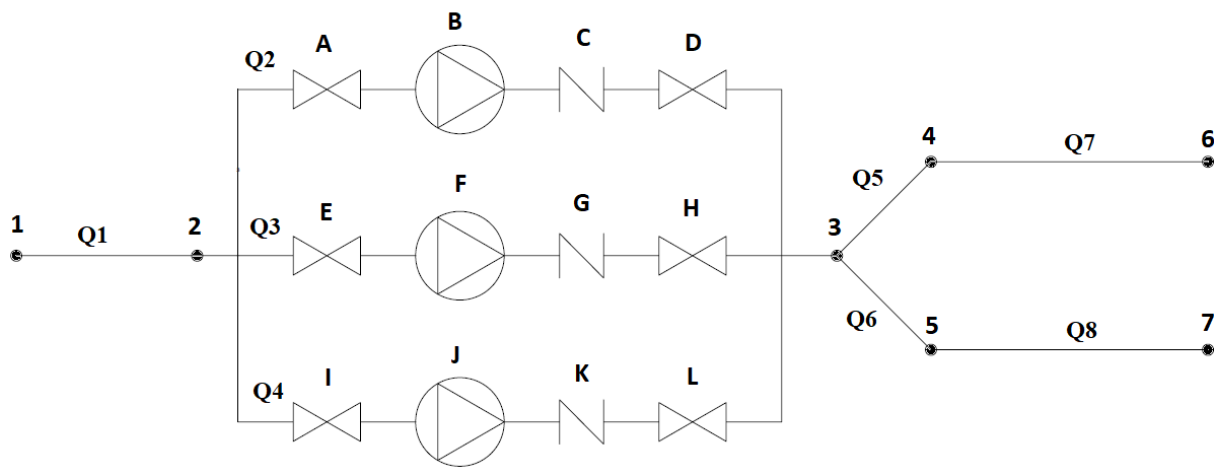


*Fonte: Autoria Própria*

## 6. METODOLOGIA

O primeiro passo foi fazer um esboço (Figura 15) para simplificar e facilitar o entendimento do problema, realizando o tagueamento de alguns pontos na tubulação de sucção e recalque (1 ao 7), da vazão em cada elemento (Q1 ao Q8), das bombas anfíbias (B, F e J), válvulas de retenção (C, G e K) e válvulas borboletas (A, D, E, H, I e L) para auxiliar na demonstração do equacionamento.

Figura 15 – Esboço simplificado da ampliação do sistema.



Fonte: Autoria Própria

Deste modo, é possível aplicar a equação da energia mecânica para fluidos em cada elemento, ou seja, entre dois pontos. De acordo com ÇENGEL e CIMBALA (2012), em sistema hidráulico que envolve bomba, a equação da energia entre dois pontos pode ser expressa em termos de carga como:

$$H_1 + H_b - H_p = H_2 \quad (1)$$

Onde em cada ponto,

$$H_n = \frac{P_n}{\rho g} + \alpha_n \frac{V_n^2}{2g} + z_n \quad (2)$$



Assim,

$$\left[ \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right] + H_b - H_p = \left[ \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right] \quad (3)$$

O termo  $\frac{P}{\rho g}$  é a energia de pressão,  $\alpha \frac{V^2}{2g}$  é a energia cinética com um fator de correção de energia cinética  $\alpha$  cujo o valor é aproximadamente 1 para a maioria dos escoamentos turbulentos,  $Z$  é a energia potencial,  $H_b$  é a energia fornecida pela bomba e  $H_p$  são as perdas totais de cargas na tubulação e acessórios. Os termos da Equação 3 têm unidades de comprimento [m] e podem ser associados com altura equivalente da coluna de fluido (ÇENGEL e CIMBALA, 2012).

A pressão sobre a superfície livre no reservatório de captação e na saída do bolo de noiva é a pressão atmosférica, logo a energia de pressão nestes pontos é nula. O nível da água nestes locais permanece constante com a operação das bombas, assim a velocidade de transporte é zero, anulando a energia cinética.

Desta maneira, sabendo a energia fornecida pelas bombas, a soma total das perdas de carga durante a trajetória do fluido e a variação da altura manométrica total entre a entrada e saída do fluido é possível estimar a vazão final.

Considerando-se como referencial o eixo longitudinal das bombas, por projeto, têm-se como 1,5 metros a energia mecânica no ponto 1, por ser o menor nível d'água já registrado no canal de captação; e 12,5 metros a energia mecânica nos pontos 6 e 7, por ser a variação da altura manométrica entre o eixo longitudinal das bombas e o bolo de noiva.

### ***6.1. Carga fornecida pelas bombas***

A potência e desempenho de uma bomba não são constantes e sofre variações em função da vazão. Os fabricantes de bombas fornecem curvas características das bombas através de testes experimentais, o que é possível determinar o comportamento da bomba em uma determinada vazão.

No presente estudo, utilizam bombas anfíbias de potências diferentes, sendo uma de 250 cv (B) e duas de 150 cv (F e J). A diferença da potência é para obter uma variação da vazão, pois a capacidade de tratamento não é constante ao longo do dia.

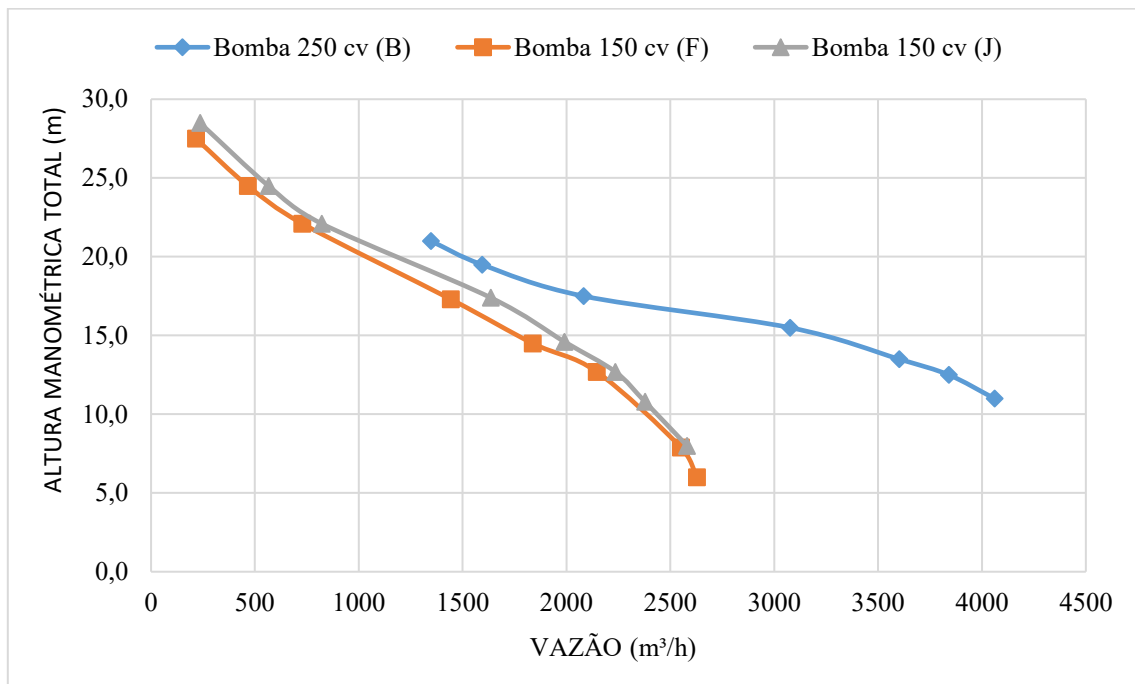
Foi realizado pelo fabricante (Helibombas) o teste hidrostático das bombas, acompanhado de supervisores técnicos do DMAE e a Tabela 1 mostra os resultados obtidos, também representado como curva característica de altura manométrica total em função da vazão, como observado no Gráfico 1.

*Tabela 1 – Resultado do teste hidrostático das bombas.*

Bomba 250 cv (B)			Bomba 150 cv (F)			Bomba 150 cv (J)		
Altura Manométrica Total (m)	Vazão		Altura Manométrica Total (m)	Vazão		Altura Manométrica Total (m)	Vazão	
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s		m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s		m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s
21,0	1347	0,37417	27,5	216	0,06000	28,5	235	0,06528
19,5	1593	0,44250	24,5	466	0,12944	24,5	565	0,15694
17,5	2082	0,57833	22,1	728	0,20222	22,1	821	0,22806
15,5	3075	0,85417	17,3	1443	0,40083	17,4	1635	0,45417
13,5	3601	1,00028	14,5	1837	0,51028	14,6	1990	0,55278
12,5	3840	1,06667	12,7	2145	0,59583	12,7	2234	0,62056
11,0	4060	1,12778	7,9	2550	0,70833	10,8	2377	0,66028
			6,0	2627	0,72972	8,0	2580	0,71667

*Fonte: Catálogo fabricante Helibombas.*

Gráfico 1 – Curvas características das bombas, altura manométrica total (m) em função vazão (m³/h).



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 2 exibe as curvas características em função da vazão em m³/s, que são unidades de medida utilizadas no equacionamento, linhas de tendência e equações da mesma. Devido as bombas F e J serem de mesma potência, fez-se a interpolação dos dados experimentais, obtendo uma única curva característica para representar o comportamento de ambas. As equações obtidas foram usadas para o equacionamento do memorial de cálculo, sendo elas:

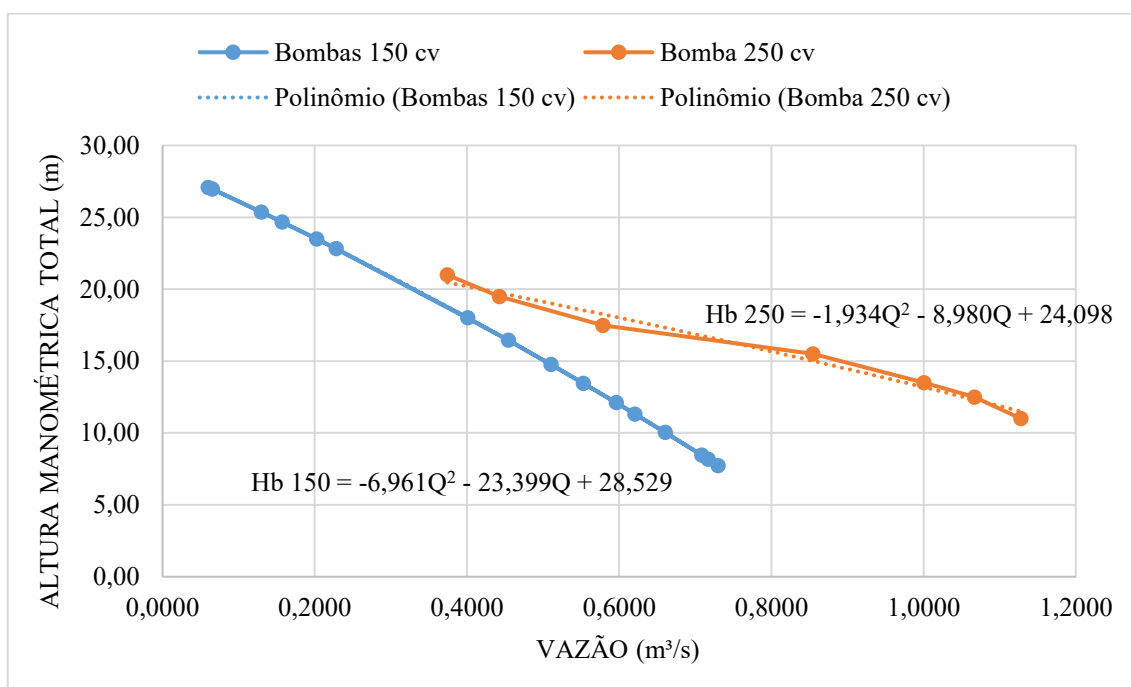
Bomba 250 cv:

$$H_{b,250} = - 1,934Q^2 - 8,980Q + 24,098 \quad (4)$$

Bombas 150 cv:

$$H_{b,150} = - 6,961Q^2 - 23,399Q + 28,529 \quad (5)$$

Gráfico 2 – Curvas características das bombas, altura manométrica total (m) em função vazão (m³/s).



Fonte: Autoria própria.

## 6.2. Perda de carga em válvulas

As válvulas utilizadas no projeto são válvulas borboletas com diâmetro da 400 mm (E e I), válvulas de retenção de fechamento rápido com diâmetro de 600 mm (C, G e K) e válvulas borboletas com diâmetro de 600 mm (A, D, H e L). Válvulas do tipo borboletas foram pelo fato de funcionar tanto como uma válvula de controle de fluxo quanto uma válvula de bloqueio, auxiliando em possíveis paradas de manutenção e as válvulas de retenção de fechamento rápido por apresentar uma maior vida útil em relação a outros tipos, como de portinhola.

Para quantificar a perda de carga em válvulas, os fabricantes fornecem catálogos com equações e informações sobre o coeficiente de vazão ( $Kv$ ). Em válvulas, a perda de carga é determinada pela equação 6, variando de acordo com a vazão [m³/s] e o coeficiente de vazão [adimensional].

$$H_{pVálvulas} = 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q}{Kv} \right)^2 \quad (6)$$

A Tabela 2 mostra os dados do coeficiente de vazão ( $Kv$ ) das válvulas borboleta em diferentes diâmetros, fornecidos pelo fabricante (VCW Válvulas). Para determinar a influência do ângulo de abertura ( $p$ ) no valor do  $Kv$ , transpôs os dados das válvulas borboletas utilizadas em forma de gráfico, sendo possível definir uma equação do  $Kv$  em função do ângulo de abertura, de acordo com o Gráfico 3, sendo as equações:

$$Kv_{400} = 0,0170p^3 - 0,7022p^2 + 45,8856p - 141,7302 \quad (7)$$

$$Kv_{600} = 0,0475p^3 - 2,3606p^2 + 123,8423p - 474,7778 \quad (8)$$

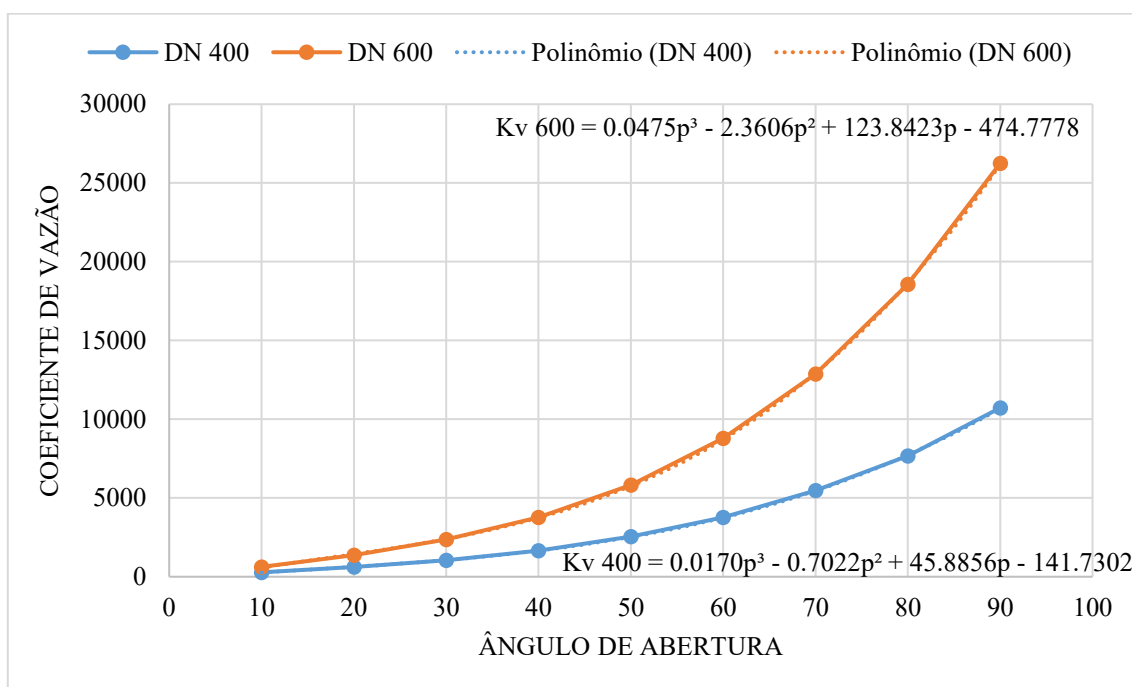
Apesar de definir equações de  $Kv$  em função do ângulo de abertura, foi considerada as válvulas borboletas totalmente abertas, logo, considerando um ângulo de abertura de 90 graus.

Tabela 2 – Coeficiente de vazão em válvulas borboletas.

Coeficiente de Vazão Válvula Borboleta Bi-Excêntrica (Kv)									
Diâmetro da Válvula (mm)	Ângulo de Abertura do Disco (p)								
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
350	215	470	805	1265	1950	2866	4050	5808	8030
400	280	610	1050	1652	2550	3766	5475	7670	10720
450	355	772	1330	2090	3225	4775	6925	9710	13570
500	434	950	1578	2615	4028	6055	8700	12495	17560
600	625	1364	2364	3764	5815	8780	12880	18570	26250
700	783	1710	2962	4715	7290	12145	16145	23350	36100

Fonte: VCW Válvulas.

Gráfico 3 – Curvas do coeficiente de vazão em função do ângulo de abertura em válvulas borboletas.



Fonte: Autoria própria.

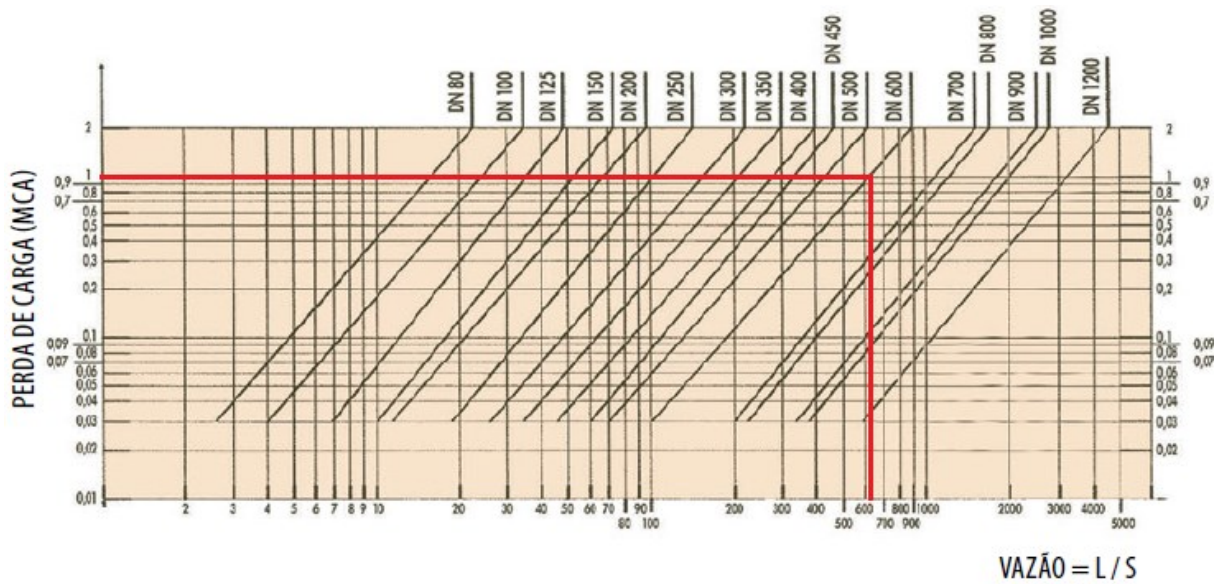
Nas válvulas de retenção de fechamento rápido, a perda de carga em função da vazão também é determinada pela equação 6, e o coeficiente de vazão ( $K_v$ ) é fornecido pelo fabricante.

A Figura 16 mostra a perda de carga (mca) em função da vazão do fluido (L/s) de válvula de retenção de fechamento rápido em diferentes diâmetros, sendo que, para uma válvula com diâmetro de 600 milímetros, a vazão do fluido com uma perda de carga de 1 mca é de aproximadamente 620 L/s.

O coeficiente de vazão ( $K_v$ ) é traduzido como a vazão em  $m^3/h$  que passa pelo componente com uma perda de carga de 1 bar, portanto, para determinar o  $K_v$  da válvula de retenção utiliza a Equação 9, fazendo a conversão de mca para bar (1 mca = 0,1 bar) e a vazão de L/s para  $m^3/h$  ( $620 \text{ L/s} = 2232 \text{ m}^3/h$ ).

$$K_{v_{ret}} = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{2232}{\sqrt{0,1}} \quad (9)$$

Figura 16 – Dados fornecidos pelo fabricante da perda de carga em função vazão do fluido em diferentes diâmetros de válvula de retenção de fechamento rápido.



Fonte: VCW Válvulas.

### 6.3. Perda de carga em tubos retos

Segundo ÇENGEL e CIMBALA (2012), para determinar a perda de carga na tubulação em termos de altura equivalente da coluna de fluido, é utilizado a equação de Darcy:

$$H_{p_{tubos}} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (10)$$

Sabe-se que a vazão e a área em tubos circulares como:

$$Q = VA \quad (11)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (12)$$

A Equação 10 pode ser representada em função da vazão em m<sup>3</sup>/s:

$$Hp_{tubos} = f \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) \quad (13)$$

Onde  $f$  é o fator de atrito,  $L$  é o comprimento da tubulação,  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $Q$  é a vazão e  $g$  é a gravidade.

Existem diversas formas de se obter o fator de atrito em escoamentos turbulentos, devido a utilização de um software para realização dos cálculos, a equação matemática empregada para calcular o fator de atrito em tubos foi a equação empírica de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (14)$$

$$Re = \frac{VD}{\vartheta} = \frac{4Q}{\pi D \vartheta} \quad (15)$$

Logo, em função da vazão em m<sup>3</sup>/s, temos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4Q}{\pi D \vartheta} \sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

Onde  $\varepsilon$  é a rugosidade absoluta da parede do tubo e  $\vartheta$  é a viscosidade cinemática do fluido. A norma ABNT NBR 6400, fornece valores para a rugosidade e viscosidade, sendo  $\varepsilon = 5,186 * 10^{-5}$  [m] e  $\vartheta = 1,022 * 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s].

Comumente em projetos hidráulicos a perda de carga é calculada pelo método de Hazen-Williams, este apresenta maiores perdas de cálculos quando comparado ao método descrito anteriormente.

A Tabela 3 fornece outros dados de projeto necessários para realização dos cálculos de perda de carga na tubulação, como diâmetro externo, espessura, diâmetro interno e comprimento de cada elemento. Foi desconsiderado a perda de carga na tubulação no elemento



2-3 por apresentar um comprimento total muito inferior aos demais elementos, assim, não apresentando uma influência significativa no resultado final.

*Tabela 3 – Dados de projeto sobre as tubulações utilizadas.*

<b>Elemento</b>	<b>Diâmetro Externo [m]</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Diâmetro Interno [m]</b>	<b>Comprimento Total [m]</b>
1 - 2	9,60E-01	4,76E-03	9,50E-01	11,07
3 - 4	7,00E-01	4,76E-03	6,90E-01	68,3
3 - 5	7,00E-01	4,76E-03	6,90E-01	67
4 - 6	9,60E-01	4,76E-03	9,50E-01	113
5 - 7	9,60E-01	4,76E-03	9,50E-01	93

*Fonte: Autoria própria.*

#### **6.4. Perda de carga local em conexões**

Em um sistema típico de tubulação, o fluido passa através de diversas curvas, cotovelos, tês, extensões, reduções, entre outros. Estes componentes apresentam uma perda de carga adicional ao fluido por dificultar o seu escoamento, sendo estes valores de perdas, dados fornecidos por fabricante, que varia de acordo com o diâmetro da tubulação.

Em sistemas com um grande comprimento de tubos, as perdas de carga em conexões são denominadas perdas menores, quando se comparado a perda total de carga nos tubos (ÇENGEL e CIMBALA, 2012). Neste caso, foi conveniente desprezar estas perdas locais no projeto, por apresentar poucas conexões existentes e grandes comprimentos de tubos retos.

#### **6.5. Modelagem matemática no EES**

Após definir as equações de perdas e ganhos, foi possível simular com o auxílio EES diferentes situações de operações das bombas, e que todas as modelagens matemáticas realizadas neste trabalho se encontram em anexo. Realizou a simulação de operação com uma bomba de 150 cv (anexo A), com uma bomba de 250 cv (anexo B), com duas bombas de 150 cv (anexo C), com uma bomba de 150 cv e uma de 250cv (anexo D) e com todas as bombas (anexo E).

O equacionamento da simulação foi feito com aplicação da equação de energia mecânica em cada elemento, do início ao fim do trajeto da água, fazendo o devido balanço das vazões. Toma-se como exemplo a operação com todas as bombas, o equacionamento ficaria de acordo com o modelo a seguir, em que aplica a mesma lógica para as outras operações, sendo necessário apenas alterar o balanço da vazão e considerar somente as equações das respectivas bombas em operação no elemento 2-3.

- Balanço das vazões

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6$$

$$Q_5 = Q_7$$

$$Q_6 = Q_8$$

- Equações elemento 1-2

$$\frac{1}{\sqrt{f_{1.2}}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D_{1.2}}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4Q_1}{\pi D_{1.2}^3} \sqrt{f_{1.2}}} \right)$$

$$H_1 - f_{1.2} \frac{L_{1.2}}{D_{1.2}} \left( \frac{8Q_1^2}{\pi^2 g D_{1.2}^4} \right) = H_2$$

$$Perda_1 = f_{1.2} \frac{L_{1.2}}{D_{1.2}} \left( \frac{8Q_1^2}{\pi^2 g D_{1.2}^4} \right)$$

- Equações elemento 2-3

$$H_2 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_2}{Kv_{600}} \right)^2 - 1,934Q_2^2 - 8,980Q_2 + 24,098 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_2}{Kv_{ret}} \right)^2 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_2}{Kv_{600}} \right)^2 = H_3$$

$$Perda_2 = +1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_2}{Kv_{600}} \right)^2 + 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_2}{Kv_{ret}} \right)^2 + 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_2}{Kv_{600}} \right)^2$$

$$H_2 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_3}{Kv_{400}} \right)^2 - 6,961Q_3^2 - 23,399Q_3 + 28,529 \left( \frac{Q_3}{Kv_{ret}} \right)^2 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_3}{Kv_{600}} \right)^2 = H_3$$

$$Perda_3 = +1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_3}{Kv_{400}} \right)^2 + 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_3}{Kv_{ret}} \right)^2 + 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_3}{Kv_{600}} \right)^2$$

$$H_2 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_4}{Kv_{400}} \right)^2 - 6,961Q_4^2 - 23,399Q_4 + 28,529 \left( \frac{Q_4}{Kv_{ret}} \right)^2 - 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_4}{Kv_{600}} \right)^2 = H_3$$

$$Perda_4 = +1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_4}{Kv_{400}} \right)^2 + 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_4}{Kv_{ret}} \right)^2 + 1,296 * 10^8 \left( \frac{Q_4}{Kv_{600}} \right)^2$$

- Equações elemento 3-4

$$\frac{1}{\sqrt{f_{3.4}}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D_{3.4}}{3,7} + \frac{2,51}{\pi D_{3.4}^5 \sqrt{f_{3.4}}} \right)$$

$$H_3 - f_{3.4} \frac{L_{3.4}}{D_{3.4}} \left( \frac{8Q_5^2}{\pi^2 g D_{3.4}^4} \right) = H_4$$

$$Perda_5 = f_{3.4} \frac{L_{3.4}}{D_{3.4}} \left( \frac{8Q_5^2}{\pi^2 g D_{3.4}^4} \right)$$

- Equações elemento 3-5

$$\frac{1}{\sqrt{f_{3.5}}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D_{3.5}}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4Q_6}{\pi D_{3.5}^3} \sqrt{f_{3.5}}} \right)$$

$$H_3 - f_{3.5} \frac{L_{3.5}}{D_{3.5}} \left( \frac{8Q_6^2}{\pi^2 g D_{3.5}^4} \right) = H_5$$

$$Perda_6 = f_{3.5} \frac{L_{3.5}}{D_{3.5}} \left( \frac{8Q_6^2}{\pi^2 g D_{3.5}^4} \right)$$

- Equações elemento 4-6

$$\frac{1}{\sqrt{f_{4.6}}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D_{4.6}}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4Q_7}{\pi D_{4.6}^3} \sqrt{f_{4.6}}} \right)$$

$$H_4 - f_{4.6} \frac{L_{4.6}}{D_{4.6}} \left( \frac{8Q_7^2}{\pi^2 g D_{4.6}^4} \right) = H_6$$

$$Perda_7 = f_{4.6} \frac{L_{4.6}}{D_{4.6}} \left( \frac{8Q_7^2}{\pi^2 g D_{4.6}^4} \right)$$

- Equações elemento 5-7

$$\frac{1}{\sqrt{f_{5.7}}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D_{5.7}}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4Q_8}{\pi D_{5.7}^3} \sqrt{f_{5.7}}} \right)$$

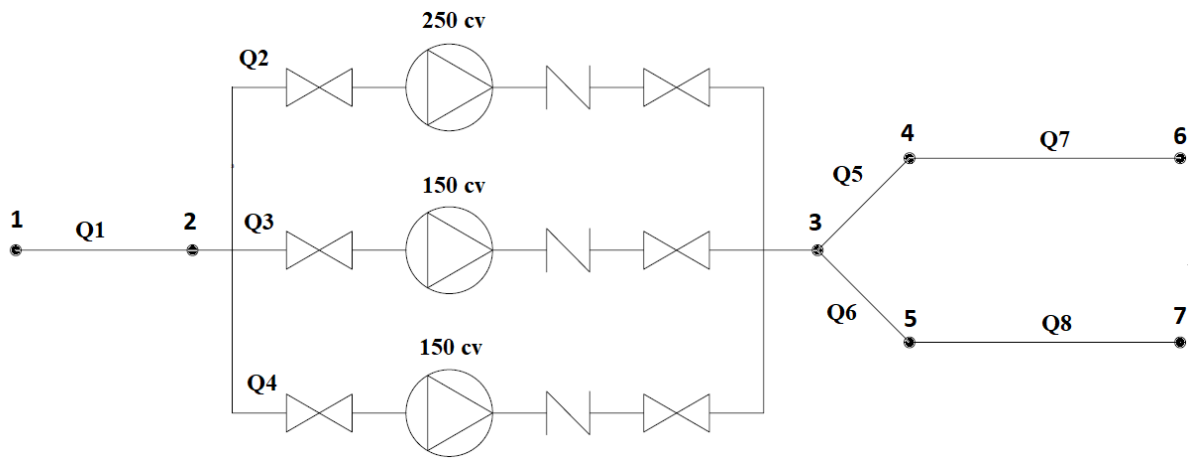
$$H_5 - f_{5.7} \frac{L_{5.7}}{D_{5.7}} \left( \frac{8Q_8^2}{\pi^2 g D_{5.7}^4} \right) = H_7$$

$$Perda_8 = f_{5.7} \frac{L_{5.7}}{D_{5.7}} \left( \frac{8Q_8^2}{\pi^2 g D_{5.7}^4} \right)$$

## 7. RESULTADOS

Após o estudo das teorias de ganho e perda, aplicação da equação mecânica para fluidos, a modelagem matemática desenvolvida e os cálculos realizados, obteve os resultados para cada operação. Para auxiliar na compreensão dos resultados, a figura 17 traz novamente o esboço do projeto.

Figura 17 – Esboço geral da instalação.



Fonte: Autoria própria.

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados obtidos com a operação de apenas uma bomba, de 150 cv ou de 250 cv, respectivamente. Nas tabelas encontram os resultados da perda de carga em cada elemento, da energia mecânica e da vazão em cada nó. A vazão final com a bomba de 150 cv é de 0,59 m<sup>3</sup>/s, enquanto com a bomba de 250 cv é de 0,95 m<sup>3</sup>/s.

Tabela 4 – Resultados da operação com uma bomba 150 cv.

	H <sub>n</sub> [m]	Perda <sub>n</sub> [m]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>n</sub> [L/s]
<b>1</b>	1,500	0,005	0,586	2111	586
<b>2</b>	1,495	-	0	0	0
<b>3</b>	12,557	1,350	0,586	2111	586
<b>4</b>	12,514	-	0	0	0
<b>5</b>	12,513	0,042	0,288	1038	288
<b>6</b>	12,500	0,044	0,298	1073	298
<b>7</b>	12,500	0,014	0,288	1038	288
<b>8</b>		0,013	0,298	1073	298

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Resultados da operação de uma bomba 250 cv.

	H <sub>n</sub> [m]	Perda <sub>n</sub> [m]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>n</sub> [L/s]
<b>1</b>	1,500	0,013	0,949	3416	949
<b>2</b>	1,487	2,683	0,949	3416	949
<b>3</b>	12,640	-	0	0	0
<b>4</b>	12,535	-	0	0	0
<b>5</b>	12,531	0,104	0,467	1680	467
<b>6</b>	12,500	0,109	0,482	1736	482
<b>7</b>	12,500	0,035	0,467	1680	467
<b>8</b>		0,031	0,482	1736	482

Fonte: Autoria própria.

O sistema quando opera com duas bombas, atinge uma vazão de 1,16 m<sup>3</sup>/s quando acionadas as bombas de mesma potência e uma vazão de 1,52 m<sup>3</sup>/s com bombas de potências diferentes. As tabelas 6 e 7 mostram os resultados da energia mecânica, perda de carga e vazão em cada caso.

Tabela 6 - Resultados da operação de duas bombas 150 cv.

	H <sub>n</sub> [m]	Perda <sub>n</sub> [m]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>n</sub> [L/s]
<b>1</b>	1,500	0,019	1,164	4190	1164
<b>2</b>	1,481	-	0	0	0
<b>3</b>	12,706	1,329	0,582	2095	582
<b>4</b>	12,552	1,329	0,582	2095	582
<b>5</b>	12,545	0,154	0,573	2062	573
<b>6</b>	12,500	0,160	0,591	2129	591
<b>7</b>	12,500	0,052	0,573	2062	573
<b>8</b>		0,045	0,591	2129	591

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Resultados da operação de uma bomba 150 cv e uma bomba de 250 cv.

	H <sub>n</sub> [m]	Perda <sub>n</sub> [m]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>n</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>n</sub> [L/s]
<b>1</b>	1,500	0,032	1,515	5453	1515
<b>2</b>	1,468	2,615	0,937	3373	937
<b>3</b>	12,839	1,310	0,578	2080	578
<b>4</b>	12,585	-	0	0	0
<b>5</b>	12,575	0,254	0,745	2683	745
<b>6</b>	12,50	0,265	0,769	2770	769
<b>7</b>	12,50	0,085	0,745	2683	745
<b>8</b>		0,075	0,769	2770	769

Fonte: Autoria própria

Quando todas as bombas estão em operação, a vazão de projeto é alcançada, chegando a uma vazão de 2,06 m<sup>3</sup>/s. Os resultados desta operação podem ser encontrados na Tabela 8. Cada tipo de operação têm uma vazão final diferente no sistema, constatando que o aumento na capacidade máxima de tratamento somente é obtido quando todas as bombas são acionadas simultaneamente.



Tabela 8 - Resultados da operação de todas as bombas.

	<b>H<sub>n</sub> [m]</b>	<b>Perda<sub>n</sub> [m]</b>	<b>Q<sub>n</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Q<sub>n</sub> [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>Q<sub>n</sub> [L/s]</b>
<b>1</b>	1,50	0,058	2,060	7414	2060
<b>2</b>	1,442	2,524	0,920	3313	920
<b>3</b>	13,112	1,273	0,570	2050	570
<b>4</b>	12,653	1,273	0,570	2050	570
<b>5</b>	12,633	0,459	1,014	3649	1014
<b>6</b>	12,500	0,478	1,046	3765	1046
<b>7</b>	12,500	0,153	1,014	3649	1014
<b>8</b>		0,133	1,046	3765	1046

Fonte: Autoria própria.

Quando foi analisado a perda de carga em tubos retos, foi possível observar que quanto menor o comprimento dos tubos, menor é a perda, sendo plausível despreza-las no elemento 2-3 por apresentar pequenos comprimentos de tubo em relação ao todo.

Uma das características do fluido é que ele flui onde se encontra uma menor resistência, ou seja, onde a perda de carga é menor. Esse fator pode ser observado pela diferença entre as vazões 7 e 8, sendo a vazão 7 menor, pois o elemento 5-7 apresenta uma perda de carga maior que o elemento 4-6.

Em resumo, a Tabela 9 traz as vazões finais de cada tipo de operação.

Tabela 9 – Vazões finais em cada tipo de operação.

<b>Bombas em operação</b>	<b>Vazão [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>150</b>	0,59
<b>250</b>	0,95
<b>150 + 150</b>	1,16
<b>150 + 250</b>	1,52
<b>Todas</b>	2,06

Fonte: Autoria própria.

Atualmente para atingir a vazão máxima de água no tratamento de 1,6 m<sup>3</sup>/s, todos os sistemas elétricos presentes na casa de máquinas devem ser acionados, totalizando uma

potência de 1025 cv. Enquanto que, com a instalação das bombas anfíbias, a vazão máxima atinge uma potência total de 550 cv que representa uma diminuição teórica de 475 cv.

É possível calcular, aproximadamente, a economia anual a partir da redução da potência da instalação das bombas anfíbias. Considerando o rendimento das bombas de 70%, o custo do kW de R\$ 0,60, e o período de estiagem por 4 meses, temos uma economia aproximada de R\$ 422.876,16.

$$475 \text{ cv} * 70\% * \frac{0,736 \text{ kW}}{1 \text{ cv}} * \frac{R\$0,60}{\text{kW}} * \frac{24 \text{ horas}}{\text{dia}} * \frac{120 \text{ dias}}{\text{ano}} = \frac{R\$422.876,16}{\text{ano}} \quad (17)$$

## 8. CONCLUSÃO

Conclui-se que com as instalações das bombas anfíbias é possível aumentar a capacidade máxima de tratamento da água da ETA Sucupira, sendo que, a vazão de projeto de  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , somente será alcançada quando todas as bombas estiverem em operação, além de envolver uma economia energética de aproximadamente 422 mil de reais por apresentar uma redução teórica de 475 cv na potência total de operação em relação ao trabalho desenvolvido pelos equipamentos da casa de máquinas.

As outras configurações de operação das bombas anfíbias servem como um escape do sistema existente, em que o tratamento da água não é afetado em caso de paradas para manutenção das turbinas e bombas centrífugas, ou até mesmo quando for conveniente financeiramente a utilização para uma certa demanda do tratamento, em que cada simulação é possível atingir um valor diferente de vazão.

Por fim, como forma de comissionamento do projeto, a modelagem matemática desenvolvida com auxílio do software de engenharia EES representa um memorial de cálculo, apresenta através de um documento, detalhes, equações e resultados finais do projeto. Os dados obtidos servirão como consulta e acompanhamento da operação diária da Estação, capaz de identificar com maior facilidade possíveis problemas. O modelo matemático desenvolvido pode ser facilmente editado, sendo possível realizar outras simulações que não foram contempladas neste trabalho ou em caso de mudanças futuras no projeto.

Pelo fato deste trabalho ser finalizado antes da operação das bombas, abre caminho para futuros estudos, como analisar a eficiência das bombas, identificar problemas presentes na captação, redimensionar as adutoras existentes oferecendo uma melhoria contínua.

## 9. REFERÊNCIAS

- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M.; **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**; tradução: Katia Aparecida Roque. AMGH Editora Ltda. Porto Alegre, 2012.
- ELETROBRÁS et al; **Bombas: guia básico**. IEL – Núcleo Central. Brasília, 2009.
- GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S.; **Manual de Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética**. Editora Universitária – UFPB. João Pessoa, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.  
< <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama> > Acesso em março de 2021.
- JUNIOR, J. B. S; **Memorial descritivo e de cálculo do projeto de sistema de abastecimento de água da comunidade de Muricituba, município de São Benedito/ CE**. Prefeitura Municipal de São Benedito – CE, 2017.
- KELLING, R.; BRANCO, R. H. F.; **Gestão de projetos: Uma abordagem global**. 3 ed, Editora Saraiva. São Paulo, 2014.
- MACINTYRE, A. J.; **Bombas e instalações de bombeamento**. 2 ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 1987.
- NETTO, A.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; **Manual de Hidráulica**. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, 1998.
- POLIZELLI, M. A; **Coefficiente de perda de carga em válvulas e acessórios no escoamento de fluidos não-newtonianos puramente viscosos e viscoelásticos**. Dissertação. São José do Rio Preto – SP, 2003.
- SANTOS, S. L; **Bombas & Instalações Hidráulicas**. LCTE Editora. São Paulo, 2007.
- TELLES, P. C. S.; **Tubulações Industriais: Cálculo**. 9 ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 1999.
- VILANOVA, L. C; **Mecânica dos Fluidos**. 3 ed, Santa Maria – RS: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso em Automação Industrial, 2010.

## 10. ANEXOS

### 10.1. ANEXO A - Código EES com uma bomba 150 cv em operação.

#### "Dados do Projeto"

$$\text{esp} = 3/16 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$

$$D_{1.2} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.4} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.5} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{4.6} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{5.7} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$L_{1.2} = 11,07$$

$$L_{3.4} = 68,30$$

$$L_{3.5} = 67,00$$

$$L_{4.6} = 113,00$$

$$L_{5.7} = 93,00$$

$$e = 5,186e-05$$

$$n_i = 1,022e-06$$

$$H[1] = 1,5$$

$$H[6] = 12,5$$

$$H[7] = 12,5$$

#### "Equação da bomba de 150 cv"

$$a_3 = -6,961$$

$$a_2 = -23,399$$

$$a_1 = +28,529$$

#### "Equação da bomba de 250 cv"

$$b_3 = -1,934$$

$$b_2 = -8,980$$

$$b_1 = +24,098$$

#### "Coeficiente de vazão das válvulas borboletas e ângulo de abertura"

$$p = 90$$

$$Kv_{400} = 0,0170 * p^3 - 0,7022 * p^2 + 45,8856 * p - 141,7302$$

$$Kv_{600} = 0,0475 * p^3 - 2,3606 * p^2 + 123,8423 * p - 474,7778$$

### "Coeficiente de vazão das válvulas de retenção"

$$Kv_{ret} = 620 * \text{convert}(l/s; m^3/h) / \text{sqrt}(0,1)$$

### "Balanço da vazão"

$$Q[1] = Q[3]$$

$$Q[3] = Q[5] + Q[6]$$

$$Q[5] = Q[7]$$

$$Q[6] = Q[8]$$

### "Equações elemento 1-2"

$$1/\text{sqrt}(f_{1.2}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{1.2}) + 2,51 / ((4 * Q[1] * \text{sqrt}(f_{1.2})) / (\pi * D_{1.2} * \text{ni})))$$

$$H[1] - f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4) = H[2]$$

$$\text{Perda}[1] = f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4)$$

### "Equações elemento 2-3"

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + a_3 * Q[3]^2 + a_2 * Q[3] + a_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[3] = 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2$$

### "Equações elemento 3-4"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.4}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.4}) + 2,51 / ((4 * Q[5] * \text{sqrt}(f_{3.4})) / (\pi * D_{3.4} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4) = H[4]$$

$$\text{Perda}[5] = f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4)$$

### "Equações elemento 3-5"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.5}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.5}) + 2,51 / ((4 * Q[6] * \text{sqrt}(f_{3.5})) / (\pi * D_{3.5} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4) = H[5]$$

$$\text{Perda}[6] = f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4)$$

### "Equações elemento 4-6"

$$1 / \text{sqrt}(f_{4.6}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{4.6}) + 2,51 / ((4 * Q[7] * \text{sqrt}(f_{4.6})) / (\pi * D_{4.6} * \text{ni})))$$

$$H[4] - f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4) = H[6]$$

$$\text{Perda}[7] = f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4)$$

### "Equações elemento 5-7"

$$1 / \sqrt{f_{5.7}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{e}{3,7 \cdot D_{5.7}} + 2,51 / \left( \frac{4 \cdot Q[8] \cdot \sqrt{f_{5.7}}}{\pi \cdot D_{5.7} \cdot \eta} \right) \right)$$

$$H[5] - f_{5.7} \cdot \left( \frac{L_{5.7}}{D_{5.7}} \right) \cdot \left( \frac{8 \cdot Q[8]^2}{\pi^2 \cdot 9,81 \cdot D_{5.7}^4} \right) = H[7]$$

$$\text{Perda [8]} = f_{5.7} \cdot \left( \frac{L_{5.7}}{D_{5.7}} \right) \cdot \left( \frac{8 \cdot Q[8]^2}{\pi^2 \cdot 9,81 \cdot D_{5.7}^4} \right)$$

### "Conversão da vazão em m<sup>3</sup>/h"

$$Q_{m3h}[1] = Q[1] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[3] = Q[3] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[5] = Q[5] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[6] = Q[6] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[7] = Q[7] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[8] = Q[8] \cdot 3600$$

### "Conversão da vazão em L/s"

$$Q_{ls}[1] = Q[1] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[3] = Q[3] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[5] = Q[5] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[6] = Q[6] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[7] = Q[7] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[8] = Q[8] \cdot 1000$$

## 10.2. ANEXO B - Código EES com uma bomba 250 cv em operação.

### "Dados do Projeto"

$$\text{esp} = 3/16 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$

$$D_{1.2} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.4} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.5} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{4.6} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{5.7} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$L_{1.2} = 11,07$$

$$L_{3.4} = 68,30$$

$$L_{3.5} = 67,00$$

$$L_{4.6} = 113,00$$

$$L_{5.7} = 93,00$$

$$e = 5,186e-05$$

$$ni = 1,022e-06$$

$$H[1] = 1,5$$

$$H[6] = 12,5$$

$$H[7] = 12,5$$

### "Equação da bomba de 150 cv"

$$a_3 = -6,961$$

$$a_2 = -23,399$$

$$a_1 = +28,529$$

### "Equação da bomba de 250 cv"

$$b_3 = -1,934$$

$$b_2 = -8,980$$

$$b_1 = +24,098$$

### "Coeficiente de vazão das válvulas borboletas e ângulo de abertura"

$$p = 90$$

$$Kv_{400} = 0,0170 * p^3 - 0,7022 * p^2 + 45,8856 * p - 141,7302$$

$$Kv_{600} = 0,0475 * p^3 - 2,3606 * p^2 + 123,8423 * p - 474,7778$$

### "Coeficiente de vazão das válvulas de retenção"



$$Kv\_ret = 620 * \text{convert}(1/s; m^3/h) / \text{sqrt}(0,1)$$

### "Balanço da vazão"

$$Q[1] = Q[2]$$

$$Q[2] = Q[5] + Q[6]$$

$$Q[5] = Q[7]$$

$$Q[6] = Q[8]$$

### "Equações elemento 1-2"

$$1/\text{sqrt}(f_{1.2}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{1.2}) + 2,51 / ((4 * Q[1] * \text{sqrt}(f_{1.2})) / (\pi * D_{1.2} * \text{ni})))$$

$$H[1] - f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4) = H[2]$$

$$\text{Perda}[1] = f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4)$$

### "Equações elemento 2-3"

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 + b_3 * Q[2]^2 + b_2 * Q[2] + b_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[2] = 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 + 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2$$

### "Equações elemento 3-4"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.4}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.4}) + 2,51 / ((4 * Q[5] * \text{sqrt}(f_{3.4})) / (\pi * D_{3.4} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4) = H[4]$$

$$\text{Perda}[5] = f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4)$$

### "Equações elemento 3-5"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.5}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.5}) + 2,51 / ((4 * Q[6] * \text{sqrt}(f_{3.5})) / (\pi * D_{3.5} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4) = H[5]$$

$$\text{Perda}[6] = f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4)$$

### "Equações elemento 4-6"

$$1 / \text{sqrt}(f_{4.6}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{4.6}) + 2,51 / ((4 * Q[7] * \text{sqrt}(f_{4.6})) / (\pi * D_{4.6} * \text{ni})))$$

$$H[4] - f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4) = H[6]$$

$$\text{Perda}[7] = f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4)$$

### "Equações elemento 5-7"

$$1 / \sqrt{f_{5.7}} = -2 * \log_{10} \left( \frac{e}{(3,7 * D_{5.7}) + 2,51 / ((4 * Q[8] * \sqrt{f_{5.7}}) / (\pi * D_{5.7} * \nu))} \right)$$

$$H[5] - f_{5.7} * (L_{5.7} / D_{5.7}) * (8 * Q[8]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{5.7}^4) = H[7]$$

$$\text{Perda [8]} = f_{5.7} * (L_{5.7} / D_{5.7}) * (8 * Q[8]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{5.7}^4)$$

"Conversão da vazão em m³/h"

$$Q_{m3h}[1] = Q[1] * 3600$$

$$Q_{m3h}[2] = Q[2] * 3600$$

$$Q_{m3h}[5] = Q[5] * 3600$$

$$Q_{m3h}[6] = Q[6] * 3600$$

$$Q_{m3h}[7] = Q[7] * 3600$$

$$Q_{m3h}[8] = Q[8] * 3600$$

"Conversão da vazão em L/s"

$$Q_{ls}[1] = Q[1] * 1000$$

$$Q_{ls}[2] = Q[2] * 1000$$

$$Q_{ls}[5] = Q[5] * 1000$$

$$Q_{ls}[6] = Q[6] * 1000$$

$$Q_{ls}[7] = Q[7] * 1000$$

$$Q_{ls}[8] = Q[8] * 1000$$

### 10.3. ANEXO C - Código EES com duas bombas 150 cv em operação.

#### "Dados do Projeto"

$$\text{esp} = 3/16 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$

$$D_{1.2} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.4} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.5} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{4.6} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{5.7} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$L_{1.2} = 11,07$$

$$L_{3.4} = 68,30$$

$$L_{3.5} = 67,00$$

$$L_{4.6} = 113,00$$

$$L_{5.7} = 93,00$$

$$e = 5,186e-05$$

$$ni = 1,022e-06$$

$$H[1] = 1,5$$

$$H[6] = 12,5$$

$$H[7] = 12,5$$

#### "Equação da bomba de 150 cv"

$$a_3 = -6,961$$

$$a_2 = -23,399$$

$$a_1 = +28,529$$

#### "Equação da bomba de 250 cv"

$$b_3 = -1,934$$

$$b_2 = -8,980$$

$$b_1 = +24,098$$

#### "Coeficiente de vazão das válvulas borboletas e ângulo de abertura"

$$p = 90$$

$$Kv_{400} = 0,0170 * p^3 - 0,7022 * p^2 + 45,8856 * p - 141,7302$$

$$Kv_{600} = 0,0475 * p^3 - 2,3606 * p^2 + 123,8423 * p - 474,7778$$

#### "Coeficiente de vazão das válvulas de retenção"

$$Kv\_ret = 620 * \text{convert}(1/s; m^3/h) / \text{sqrt}(0,1)$$

### "Balanço da vazão"

$$Q[1] = Q[3] + Q[4]$$

$$Q[3] + Q[4] = Q[5] + Q[6]$$

$$Q[5] = Q[7]$$

$$Q[6] = Q[8]$$

### "Equações elemento 1-2"

$$1/\text{sqrt}(f_{1.2}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{1.2}) + 2,51 / ((4 * Q[1] * \text{sqrt}(f_{1.2})) / (\pi * D_{1.2} * \text{ni})))$$

$$H[1] - f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4) = H[2]$$

$$\text{Perda}[1] = f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4)$$

### "Equações elemento 2-3"

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + a_3 * Q[3]^2 + a_2 * Q[3] + a_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[3] = 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2$$

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{400})^2 + a_3 * Q[4]^2 + a_2 * Q[4] + a_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[4] = 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{400})^2 + 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{600})^2$$

### "Equações elemento 3-4"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.4}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.4}) + 2,51 / ((4 * Q[5] * \text{sqrt}(f_{3.4})) / (\pi * D_{3.4} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4) = H[4]$$

$$\text{Perda}[5] = f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4)$$

### "Equações elemento 3-5"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.5}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.5}) + 2,51 / ((4 * Q[6] * \text{sqrt}(f_{3.5})) / (\pi * D_{3.5} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4) = H[5]$$

$$\text{Perda}[6] = f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4)$$

### "Equações elemento 4-6"

$$1 / \text{sqrt}(f_{4.6}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{4.6}) + 2,51 / ((4 * Q[7] * \text{sqrt}(f_{4.6})) / (\pi * D_{4.6} * \text{ni})))$$

$$H[4] - f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4) = H[6]$$

$$\text{Perda [7]} = f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4)$$

#### "Equações elemento 5-7"

$$1 / \sqrt{f_{5.7}} = -2 * \log_{10}(e / (3,7 * D_{5.7}) + 2,51 / ((4 * Q[8] * \sqrt{f_{5.7}}) / (\pi * D_{5.7} * \nu)))$$

$$H[5] - f_{5.7} * (L_{5.7} / D_{5.7}) * (8 * Q[8]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{5.7}^4) = H[7]$$

$$\text{Perda [8]} = f_{5.7} * (L_{5.7} / D_{5.7}) * (8 * Q[8]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{5.7}^4)$$

#### "Conversão da vazão em m³/h"

$$Q_{m3h}[1] = Q[1] * 3600$$

$$Q_{m3h}[3] = Q[3] * 3600$$

$$Q_{m3h}[4] = Q[4] * 3600$$

$$Q_{m3h}[5] = Q[5] * 3600$$

$$Q_{m3h}[6] = Q[6] * 3600$$

$$Q_{m3h}[7] = Q[7] * 3600$$

$$Q_{m3h}[8] = Q[8] * 3600$$

#### "Conversão da vazão em L/s"

$$Q_{ls}[1] = Q[1] * 1000$$

$$Q_{ls}[3] = Q[3] * 1000$$

$$Q_{ls}[4] = Q[4] * 1000$$

$$Q_{ls}[5] = Q[5] * 1000$$

$$Q_{ls}[6] = Q[6] * 1000$$

$$Q_{ls}[7] = Q[7] * 1000$$

$$Q_{ls}[8] = Q[8] * 1000$$

**10.4. ANEXO D - Código EES com uma bomba 150 cv e uma bomba 250 cv em operação.**

"Dados do Projeto"

$$\text{esp} = 3/16 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$

$$D_{1.2} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.4} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.5} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{4.6} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{5.7} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$L_{1.2} = 11,07$$

$$L_{3.4} = 68,30$$

$$L_{3.5} = 67,00$$

$$L_{4.6} = 113,00$$

$$L_{5.7} = 93,00$$

$$e = 5,186e-05$$

$$n_i = 1,022e-06$$

$$H[1] = 1,5$$

$$H[6] = 12,5$$

$$H[7] = 12,5$$

"Equação da bomba de 150 cv"

$$a_3 = -6,961$$

$$a_2 = -23,399$$

$$a_1 = +28,529$$

"Equação da bomba de 250 cv"

$$b_3 = -1,934$$

$$b_2 = -8,980$$

$$b_1 = +24,098$$

"Coeficiente de vazão das válvulas borboletas e ângulo de abertura"

$$p = 90$$

$$Kv_{400} = 0,0170 * p^3 - 0,7022 * p^2 + 45,8856 * p - 141,7302$$

$$Kv_{600} = 0,0475 * p^3 - 2,3606 * p^2 + 123,8423 * p - 474,7778$$

### "Coeficiente de vazão das válvulas de retenção"

$$Kv\_ret = 620 * \text{convert}(l/s; m^3/h) / \text{sqrt}(0,1)$$

### "Balanço da vazão"

$$Q[1] = Q[2] + Q[3]$$

$$Q[2] + Q[3] = Q[5] + Q[6]$$

$$Q[5] = Q[7]$$

$$Q[6] = Q[8]$$

### "Equações elemento 1-2"

$$1/\text{sqrt}(f_{1.2}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{1.2}) + 2,51 / ((4 * Q[1] * \text{sqrt}(f_{1.2})) / (\pi * D_{1.2} * \text{ni})))$$

$$H[1] - f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4) = H[2]$$

$$\text{Perda}[1] = f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4)$$

### "Equações elemento 2-3"

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 + b_3 * Q[2]^2 + b_2 * Q[2] + b_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[2] = 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 + 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2$$

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + a_3 * Q[3]^2 + a_2 * Q[3] + a_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[3] = 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2$$

### "Equações elemento 3-4"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.4}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.4}) + 2,51 / ((4 * Q[5] * \text{sqrt}(f_{3.4})) / (\pi * D_{3.4} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4) = H[4]$$

$$\text{Perda}[5] = f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4)$$

### "Equações elemento 3-5"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.5}) = -2 * \log_{10}(e/(3,7 * D_{3.5}) + 2,51 / ((4 * Q[6] * \text{sqrt}(f_{3.5})) / (\pi * D_{3.5} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4) = H[5]$$

$$\text{Perda}[6] = f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4)$$

### "Equações elemento 4-6"

$$1 / \sqrt{f_{4.6}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{e}{3,7 \cdot D_{4.6}} + 2,51 / \left( \frac{4 \cdot Q[7] \cdot \sqrt{f_{4.6}}}{\pi \cdot D_{4.6} \cdot n_i} \right) \right)$$

$$H[4] - f_{4.6} \cdot (L_{4.6} / D_{4.6}) \cdot (8 \cdot Q[7]^2) / (\pi^2 \cdot 9,81 \cdot D_{4.6}^4) = H[6]$$

$$\text{Perda [7]} = f_{4.6} \cdot (L_{4.6} / D_{4.6}) \cdot (8 \cdot Q[7]^2) / (\pi^2 \cdot 9,81 \cdot D_{4.6}^4)$$

"Equações elemento 5-7"

$$1 / \sqrt{f_{5.7}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{e}{3,7 \cdot D_{5.7}} + 2,51 / \left( \frac{4 \cdot Q[8] \cdot \sqrt{f_{5.7}}}{\pi \cdot D_{5.7} \cdot n_i} \right) \right)$$

$$H[5] - f_{5.7} \cdot (L_{5.7} / D_{5.7}) \cdot (8 \cdot Q[8]^2) / (\pi^2 \cdot 9,81 \cdot D_{5.7}^4) = H[7]$$

$$\text{Perda [8]} = f_{5.7} \cdot (L_{5.7} / D_{5.7}) \cdot (8 \cdot Q[8]^2) / (\pi^2 \cdot 9,81 \cdot D_{5.7}^4)$$

"Conversão da vazão em m<sup>3</sup>/h"

$$Q_{m3h}[1] = Q[1] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[2] = Q[2] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[3] = Q[3] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[5] = Q[5] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[6] = Q[6] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[7] = Q[7] \cdot 3600$$

$$Q_{m3h}[8] = Q[8] \cdot 3600$$

"Conversão da vazão em L/s"

$$Q_{ls}[1] = Q[1] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[2] = Q[2] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[3] = Q[3] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[5] = Q[5] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[6] = Q[6] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[7] = Q[7] \cdot 1000$$

$$Q_{ls}[8] = Q[8] \cdot 1000$$



## 10.5. ANEXO E - Código EES com todas as bombas em operação.

### "Dados do Projeto"

$$\text{esp} = 3/16 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$

$$D_{1.2} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.4} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{3.5} = 700e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{4.6} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$D_{5.7} = 960e-03 - 2 * \text{esp}$$

$$L_{1.2} = 11,07$$

$$L_{3.4} = 68,30$$

$$L_{3.5} = 67,00$$

$$L_{4.6} = 113,00$$

$$L_{5.7} = 93,00$$

$$e = 5,186e-05$$

$$ni = 1,022e-06$$

$$H[1] = 1,5$$

$$H[6] = 12,5$$

$$H[7] = 12,5$$

### "Equação da bomba de 150 cv"

$$a_3 = -6,961$$

$$a_2 = -23,399$$

$$a_1 = +28,529$$

### "Equação da bomba de 250 cv"

$$b_3 = -1,934$$

$$b_2 = -8,980$$

$$b_1 = +24,098$$

### "Coeficiente de vazão das válvulas borboletas e ângulo de abertura"

$$p = 90$$

$$Kv_{400} = 0,0170 * p^3 - 0,7022 * p^2 + 45,8856 * p - 141,7302$$

$$Kv_{600} = 0,0475 * p^3 - 2,3606 * p^2 + 123,8423 * p - 474,7778$$

### "Coeficiente de vazão das válvulas de retenção"

$$Kv\_ret = 620 * \text{convert}(1/s; m^3/h) / \text{sqrt}(0,1)$$

### "Balanço da vazão"

$$Q[1] = Q[2] + Q[3] + Q[4]$$

$$Q[2] + Q[3] + Q[4] = Q[5] + Q[6]$$

$$Q[5] = Q[7]$$

$$Q[6] = Q[8]$$

### "Equações elemento 1-2"

$$1/\text{sqrt}(f_{1.2}) = -2 * \log_{10}(e / (3,7 * D_{1.2}) + 2,51 / ((4 * Q[1] * \text{sqrt}(f_{1.2})) / (\pi * D_{1.2} * \text{ni})))$$

$$H[1] - f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4) = H[2]$$

$$\text{Perda}[1] = f_{1.2} * (L_{1.2} / D_{1.2}) * (8 * Q[1]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{1.2}^4)$$

### "Equações elemento 2-3"

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 + b_3 * Q[2]^2 + b_2 * Q[2] + b_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[2] = 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2 + 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[2] / Kv_{600})^2$$

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + a_3 * Q[3]^2 + a_2 * Q[3] + a_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[3] = 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{400})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[3] / Kv_{600})^2$$

$$H[2] - 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{400})^2 + a_3 * Q[4]^2 + a_2 * Q[4] + a_1 -$$

$$1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{ret})^2 - 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{600})^2 = H[3]$$

$$\text{Perda}[4] = 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{400})^2 + 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{ret})^2 + 1,296e+08 * (Q[4] / Kv_{600})^2$$

### "Equações elemento 3-4"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.4}) = -2 * \log_{10}(e / (3,7 * D_{3.4}) + 2,51 / ((4 * Q[5] * \text{sqrt}(f_{3.4})) / (\pi * D_{3.4} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4) = H[4]$$

$$\text{Perda}[5] = f_{3.4} * (L_{3.4} / D_{3.4}) * (8 * Q[5]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.4}^4)$$

### "Equações elemento 3-5"

$$1 / \text{sqrt}(f_{3.5}) = -2 * \log_{10}(e / (3,7 * D_{3.5}) + 2,51 / ((4 * Q[6] * \text{sqrt}(f_{3.5})) / (\pi * D_{3.5} * \text{ni})))$$

$$H[3] - f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4) = H[5]$$

$$\text{Perda [6]} = f_{3.5} * (L_{3.5} / D_{3.5}) * (8 * Q[6]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{3.5}^4)$$

#### "Equações elemento 4-6"

$$1 / \sqrt{f_{4.6}} = -2 * \log_{10}(e / (3,7 * D_{4.6}) + 2,51 / ((4 * Q[7] * \sqrt{f_{4.6}}) / (\pi * D_{4.6} * \text{ni})))$$

$$H[4] - f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4) = H[6]$$

$$\text{Perda [7]} = f_{4.6} * (L_{4.6} / D_{4.6}) * (8 * Q[7]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{4.6}^4)$$

#### "Equações elemento 5-7"

$$1 / \sqrt{f_{5.7}} = -2 * \log_{10}(e / (3,7 * D_{5.7}) + 2,51 / ((4 * Q[8] * \sqrt{f_{5.7}}) / (\pi * D_{5.7} * \text{ni})))$$

$$H[5] - f_{5.7} * (L_{5.7} / D_{5.7}) * (8 * Q[8]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{5.7}^4) = H[7]$$

$$\text{Perda [8]} = f_{5.7} * (L_{5.7} / D_{5.7}) * (8 * Q[8]^2) / (\pi^2 * 9,81 * D_{5.7}^4)$$

#### "Conversão da vazão em m<sup>3</sup>/h"

$$Q_{m3h}[1] = Q[1] * 3600$$

$$Q_{m3h}[2] = Q[2] * 3600$$

$$Q_{m3h}[3] = Q[3] * 3600$$

$$Q_{m3h}[4] = Q[4] * 3600$$

$$Q_{m3h}[5] = Q[5] * 3600$$

$$Q_{m3h}[6] = Q[6] * 3600$$

$$Q_{m3h}[7] = Q[7] * 3600$$

$$Q_{m3h}[8] = Q[8] * 3600$$

#### "Conversão da vazão em L/s"

$$Q_{ls}[1] = Q[1] * 1000$$

$$Q_{ls}[2] = Q[2] * 1000$$

$$Q_{ls}[3] = Q[3] * 1000$$

$$Q_{ls}[4] = Q[4] * 1000$$

$$Q_{ls}[5] = Q[5] * 1000$$

$$Q_{ls}[6] = Q[6] * 1000$$

$$Q_{ls}[7] = Q[7] * 1000$$

$$Q_{ls}[8] = Q[8] * 1000$$