



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM MATEMÁTICA E PROJETO DE SKID
DIDÁTICO DE BOMBAS PARA O ENSINO DE
FENÔMENOS DE BOMBEAMENTO E
TRANSPORTE

YANNES PINTO MEDEIROS
NATAL- RN, 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM MATEMÁTICA E PROJETO DE SKID
DIDÁTICO DE BOMBAS PARA O ENSINO DE
FENÔMENOS DE BOMBEAMENTO E
TRANSPORTE

YANNES PINTO MEDEIROS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Química da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Engenheiro Químico, orientado pelo
Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira.

NATAL - RN
2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Medeiros, Yannes Pinto.

Modelagem matemática e projeto de skid didático de bombas para o ensino de fenômenos de bombeamento e transporte / Yannes Pinto Medeiros. - 2022.

70f.: il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Natal, 2022.

Orientador: Dr. Jackson Araújo de Oliveira.

1. Modelagem matemática - Monografia. 2. Fenômenos de transporte - Monografia. 3. Sistema de bombeio - Monografia. I. Oliveira, Jackson Araújo. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM MATEMÁTICA E PROJETO DE SKID
DIDÁTICO DE BOMBAS PARA O ENSINO DE
FENÔMENOS DE BOMBEAMENTO E
TRANSPORTE

YANNES PINTO MEDEIROS

Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Orientador

Prof. Dra. Katherine Carrilho De Oliveira Deus _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. Humberto Neves Maia De Oliveira _____

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

NATAL, 02 de fevereiro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

A minha querida família que mesmo distante nunca deixou de acreditar em mim e sempre esteve a me apoiar em minhas decisões, estando ao lado nos momentos mais difíceis me proporcionando toda motivação.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química que sempre estiveram dispostos a me ajudar e me proporcionar a experiência que adquiri com todos os aprendizados.

Aos colegas e amigos que fiz através do curso de Engenharia Química que sempre estiveram ao meu lado, me ouvindo e aconselhando e me impulsionando.

Entre outros mais que fizeram parte de todo o processo de minha formação, meus sinceros agradecimentos.

MEDEIROS, Yannes Pinto. Modelagem matemática e projeto de skid didático de bombas para o ensino de fenômenos de bombeamento e transporte. 2022. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

Resumo

O presente trabalho consiste na modelagem matemática e dimensionamento de um protótipo didático com o foco voltado para os fenômenos de transporte e de bombeio. Foi listado neste trabalho todos os conceitos teóricos inerentes aos processos de bombeio que o kit didático é apto, sendo abordado: o dimensionamento e justificativa das motobombas escolhidas para tal, listagem dos itens necessários, esquema de ligação dos acessórios e bombas, maquete do sistema e descrição dos fenômenos. O material servirá para a integração de conhecimentos no ensino de fenômenos de transporte, permitindo ao aluno interagir com o sistema por meio de uma planilha automatizada. Com o kit será possível observar os principais eventos de bombeio que são problemas recorrentes na indústria, permitindo ao aluno uma maior proximidade com os desafios que o esperam no mercado.

Palavras-Chave: Sistema de bombeio, fenômenos de transporte, kit laboratorial didático, modelagem matemática.

MEDEIROS, Yannes Pinto. Math model and dizing of a didactic laboratory kit for teaching pumping and transport phenomena. 2020. 70 p. Conclusion work project (Graduate in Chemical Engineering) - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

Abstract

The current work presents a mathematical modeling and the project of a didactic prototype for the physical pumping phenomena. It was listed in this work all theoretical concepts inherent to the pumping process, justifying the characteristics of the didactic prototype, such as: sizing, type of pumps, connections, accessories as well as the system model, description of the phenomena. The material produced in this work can be used to integration of knowledge in the teaching of transport phenomena, allowing the student to interact with the device through an automated spreadsheet. From this kit it will be possible to promote the main pumping events that are problems observed in the industry, allowing to the student to be closer to the challenges in industrial ambient.

Keywords: mathematical model, pumping system, transport phenomena, didactic laboratory kit.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	DENSIDADE	3
2.2	ABRASIVIDADE E TEOR DE SÓLIDOS	3
2.3	PRESSÃO DE VAPOR.....	3
2.4	CÁLCULOS DE PRESSÃO	4
2.4.1	PRESSÃO ESTÁTICA	4
2.4.2	PRESSÃO DINÂMICA	5
2.5	PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA EM TUBOS.....	5
2.6	PERDA DE CARGA LOCALIZADA E O MÉTODO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE.....	6
2.7	PERDA DE CARGA TOTAL.....	7
2.8	NPSH (<i>NET POSITIVE SUCTION HEAD</i>) (ALTURA LIVRE POSITIVA DE SUCÇÃO)	8
2.9	POTÊNCIA HIDRÁULICA:	9
2.10	ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE	9
2.11	ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM PARALELO.....	11
2.12	CURVA DO SISTEMA E PONTO DE OPERAÇÃO:	12
3.	METODOLOGIA.....	14
3.1	ESCOLHA DA MOTOBOMBA E LAYOUT	14
3.2	MEDIDAS DOS 04 MODOS DE OPERAÇÃO	16
3.3	PARÂMETROS CONSTANTES	17
3.4	MÉTODO DE CÁLCULO	17
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1	OPERAÇÃO DE BOMBA 01 SOLO E BOMBA 02 SOLO	20
4.2	ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE	22
4.3	ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM PARALELO.	25

4.4 CRUZAMENTO DAS CURVAS.....	29
4.5 NPSH.....	32
4.6 POTÊNCIA HIDRÁULICA.....	36
4.6 PLANILHA AUTOMATIZADA.....	37
5. CONCLUSÕES.....	42
6. REFERÊNCIAS.....	43
7. ANEXOS.....	45

1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos experimentais de laboratório estão diretamente ligados a promover aos estudantes uma associação de caráter reflexivo dos fenômenos que ocorrem na engenharia de processos, de modo que os mesmos possam inferir nas variáveis do sistema e prever seus comportamentos a partir dos conceitos fundamentais que governam o processo em análise. Estudos demonstram que fatores cognitivos, motivacionais, comportamentais e sociais são afetados pela inclusão de novas tecnologias voltadas a relação de ensino-aprendizagem (CORTER et al., 2011).

Neste sentido, a área de Fenômenos de Transporte é responsável pela base fundamental de conhecimento para a Engenharia Química e a Engenharia de Alimentos, segundo as leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Adicionalmente, as áreas de modelagem matemática e controle de processos tem tido um significativo desenvolvimento como consequência da crescente evolução computacional. Portanto, o desenvolvimento de equipamentos laboratoriais de processos que integrem simulação e controle para avaliar o comportamento dinâmico destes, associando os conceitos fundamentais da área de Fenômenos de Transporte, é de grande importância para práticas adequadas de ensino, bem como para projetos de pesquisa na engenharia de processos.

As bombas com certeza são os equipamentos mais presentes na vida de qualquer engenheiro de processos, sendo a transferência de quantidades de fluido parte de várias etapas de processos produtivos. A correta especificação desse tipo de máquina advém do domínio dos conceitos que estão atrelados ao seu funcionamento. Muitos são os casos dos quais processos industriais são interrompidos devido a problemas operacionais comuns que serão abordados neste trabalho.

Para um bom aproveitamento deste material faz-se necessária a abordagem de alguns conceitos fundamentais pertencentes aos fenômenos de transporte. Os conceitos serão abordados na seguinte sequência: Composição do produto bombeado, perda de carga estática, perda de carga dinâmica, cálculos de pressão e pressão de vapor e NPSH.

O objetivo principal deste trabalho consiste na modelagem matemática de 04 modos de operação de um sistema de bombas, as quatro formas são: Bomba 01 Solo, Bomba 02 Solo, Bombas em Série e Bombas em Paralelo.

Diversos são os modelos matemáticos utilizados para descrever os processos de transferência de fluidos, auxiliando em estudos de simulação, projetos e otimização. Para o caso particular do protótipo de bombeio, os modelos matemáticos foram formulados baseados em experimentações de bancada desde o século XVIII. Neste caso, o modelo fenomenológico desenvolvido por Darcy-Weisbach (Coban, 2012), também conhecido como a Fórmula universal para perdas de carga, é bastante aplicado pelos engenheiros e pesquisadores ao redor do mundo, principalmente para o projeto de instalações hidráulicas, o qual será base para simulação dos fenômenos do kit.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Densidade

É definida como a razão da massa de um corpo pelo seu volume, sendo importante em cálculos de pressão e dimensionamento de bombas centrífugas. As principais unidades utilizadas em pesquisa e no mercado para densidade são: $[\text{kg}/\text{m}^3]$, $[\text{g}/\text{cm}^3]$, $[\text{g}/\text{mL}]$.

2.2 Abrasividade e teor de sólidos

A abrasividade é a consequência da capacidade de um material de gerar desgaste mecânico quando em contato com um outro material devido a diferença de dureza entre eles. Já o teor de sólidos é a porção de material sólido presente como articulado em uma mistura, essas duas propriedades do material de bombeio estão diretamente relacionadas com o tipo de material que a deverá compor a bomba, uma vez que a mesma deverá suportar os efeitos de desgaste provocados por tal.

Para o projeto em estudo, será utilizada a água à temperatura ambiente, sem teor de sólidos, como material de bombeio.

2.3 Pressão de Vapor

Por definição, a pressão de vapor é a força exercida por unidade de área de um fluido confinado que está em equilíbrio termodinâmico com sua fase gasosa a uma temperatura específica. Em outras palavras, em termos práticos é possível considerar que se um fluido atingir a pressão de vapor, o mesmo irá mudar para o estado gasoso. Para uma determinada temperatura de vapor (T^*) sempre haverá uma pressão de vapor (P^*) e tais parâmetros estão normalmente correlacionados através da equação de Clausius-Clapeyron (Equação 1). Apesar de útil, essa equação parte de um modelo ideal que nem sempre é válido. Por outro lado, o surgimento da equação de Antoine (Equação 2) permitiu correlacionar parâmetros experimentais da pressão de vapor de

diferentes substâncias. Para cada elemento há um conjunto de coeficientes A, B e C, como pode ser visto na Tabela 01.

$$\ln \frac{P}{P^*} = -\frac{\Delta H_{vap}}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \right) \quad (1)$$

$$\ln(P) = A - \frac{B}{C + T} \quad (2)$$

Sendo:

T : Temperatura [K]

P: Pressão de Vapor [mm/Hg]

Tabela 01 - Coeficientes da Equação de Antoine para Água.

A	B	C
11,68	3816,44	-46,13

Fonte: Adaptado de (Reid,1987)

A principal aplicação considerando a pressão de vapor em sistemas de bombeio está relacionada ao cálculo de NPSH que será abordado mais adiante.

2.4 Cálculos de pressão

A pressão, juntamente com a vazão, são os principais parâmetros que governam as condições operacionais no que diz respeito às necessidades que a bomba deverá ser capaz de suprir ao sistema para que o transporte do fluido ocorra. De um modo geral, a pressão que deve ser vencida por uma bomba é a junção de dois cálculos de pressão: Pressão estática e pressão dinâmica.

2.4.1 Pressão estática

Pode-se definir como pressão estática aquela gerada pelo fluido em repouso. Em sistemas hidráulicos, a existência de uma pressão estática está relacionada ao

desnível geométrico do sistema. Em termos práticos, é possível resumir o cálculo, na forma:

$$\text{Pressão estática} = \rho \cdot g \cdot z \quad (3)$$

Sendo:

ρ : Densidade do fluido [kg/m³]

g: Aceleração da gravidade [m/s²]

z: Desnível geométrico [m]

Pressão estática: [kg/s²m] ou [Pa]

2.4.2 Pressão dinâmica

Divididas em perdas de carga distribuída e localizada, o cálculo de pressão dinâmica deve-se levar em consideração o layout da instalação. A perda de carga ocorre ao longo dos trechos retos de tubulação e acessórios na instalação devido ao atrito. Essa perda de carga depende do diâmetro do tubo [m], comprimento [m], rugosidade [m], densidade [kg/m³], viscosidade [Pa.s] e velocidade do escoamento [m/s].

2.5 Perda de carga distribuída em tubos

A perda de carga em um tubo varia de acordo com o seu comprimento e vazão, várias experiências foram efetuadas para o desenvolvimento do cálculo de perdas de carga distribuída, sendo abordado o modelo de Darcy-Weisbach dado pela Equação 4. O modelo desenvolvido por Colebrook (1939) permite resultados com melhor aproximação para os valores do fator de atrito C_f (Coban, 2012), estando escrito de acordo com a Equação 5.

$$h = C_f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3,7} * \frac{2,51}{Re * \sqrt{C_f}} \right) \quad (5)$$

Sendo:

h: Perda de carga [m]

C_f: Coeficiente de atrito [adimensional]

L: Comprimento do tubo [m]

D: Diâmetro do tubo [m]

ε: Rugosidade do tubo [m]

Re: Número de Reynolds [adimensional]

ρ : Densidade do fluido [kg/m³]

v: Velocidade do escoamento [m/s]

D: Diâmetro do Tubo [m]

μ: Viscosidade do Fluido [Pa.s]

2.6 Perda de carga localizada e o Método do Comprimento Equivalente.

A perda de carga localizada ocorre sempre que um acessório é inserido na tubulação, seja para promover a junção de dois tubos, ou para mudar a direção do escoamento, ou ainda para controlar a vazão.

A ocorrência da perda de carga é considerada concentrada no ponto provocando uma queda acentuada da pressão no curto espaço compreendido pelo acessório.

O método utilizado para o cálculo de uma perda localizada neste trabalho é o Método do Comprimento Equivalente, que é definido como um comprimento de tubulação (L_{eq}) que causa a mesma perda de carga que um acessório específico inserido na tubulação. Na Tabela 2, são apresentados comprimentos equivalentes para diferentes peças e acessórios usados em tubulações de PVC.

Tabela 02 –Comprimentos equivalentes em metros para acessórios comerciais usados em tubulações de PVC.

Acessório	Leq (m)
Curva 90° 1" PVC	0,6
Curva 45° 1" PVC	0,4
Joelho 90° 1" PVC	1,5
Tê Passagem Direta 1" PVC	0,9
Registro de Esfera Aberto 1" PVC	0,3
Válvula de Pé c/crivo 1" PVC	13,3

Fonte: Adaptado do Catálogo de seleção de Bombas Schneider 2021

Assim, uma vez definidos todos os acessórios do sistema de tubulação, ou seja, definido o adicional teórico de tubulação ($\sum leq$) a partir da Equação 6, pode-se então calcular a perda de carga total que é contribuída pelos acessórios e comprimento da tubulação, segundo a Equação 7.

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^n L_{eq}^i \quad (6)$$

Sendo:

Leq: comprimento equivalente total[m]

L: comprimento do tubo [m]

leq: comprimento equivalente de um acessório [m]

n: número de acessórios

2.7 Perda de Carga Total

A perda de carga total (localizada + distribuída) em um determinado trecho de tubulação e acessórios pode então ser calculada através da Equação de Darcy-Weisbach (Equação 4), considerando não só o comprimento dado pelo valor de L, mas também levando em conta o comprimento equivalente Leq obtido através da Equação 6 e, assim, resultando na Equação 7:

$$h = C_f * \frac{L + Leq}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

sendo:

L: Comprimento da tubulação total[m]

Leq: comprimento equivalente dos acessórios [m]

h: perda de carga [m]

Cf: coeficiente de atrito [adimensional]

D: diâmetro do tubo [m]

v: velocidade de escoamento [m/s]

g: aceleração da gravidade [m/s²]

2.8 NPSH (*Net Positive Suction Head*) (Altura livre positiva de sucção)

O NPSH é um valor excedente da disponibilidade de aumento na capacidade de geração de vácuo de uma bomba no intuito de que o fluido chegue até a sucção do equipamento sem vaporizar.

O cálculo do NPSH é feito a partir da aplicação da sequência de Equações 8 e 9, sendo:

$$NPSH_d = P_{atm} - P_{vap} - h - z \quad (8)$$

$$NPSH = NPSH_d - NPSH_r \quad (9)$$

E tendo-se que:

NPSH \geq 1,0 m.

NPSH_d: valor excedente para elevação do fluido sem vaporização disponível para o sistema [m]

NPSHr: quantidade de elevação requerida pelo equipamento [m]

Patm: pressão atmosférica [m]

Pvap: pressão de vapor à temperatura de bombeio [m]

h: perdas de carga na linha de sucção [m]

z: desnível geométrico entre o nível do líquido (tanque) e o nível da bomba [m]

2.9 Potência Hidráulica:

Consiste na energia total fornecida ao fluido para que ocorra o deslocamento e o seu cálculo é dado pela expressão da Equação 10:

$$P_h = P_{dif} Q \rho g \quad (10)$$

Sendo:

Ph: Potência hidráulica [kg.m²/s³ ou W]

Pdif: pressão diferencial [m]

Q: vazão [m³/s]

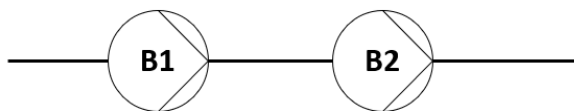
ρ : densidade [kg/m³]

g: aceleração da gravidade [m/s²]

2.10 Associação de Bombas Em Série

Associação de Bombas em Série é o layout no qual duas ou mais bombas são conectadas suas descargas nas sucções de outras bombas, conforme Figura 01 abaixo:

Figura 01 - Maquete de Associação de Bombas em Série.



Fonte: Autor

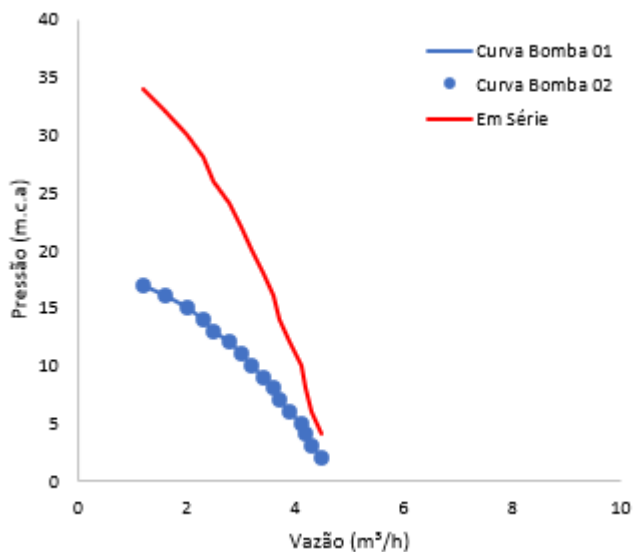
Se duas bombas iguais estão acionadas em série, o valor resultante da pressão será a soma das pressões das duas bombas descrito pela Equação 11, e a vazão será constante conforme a Equação 12.

$$P_T = P_I + P_{II} \quad (11)$$

$$Q_T = Q_I = Q_{II} \quad (12)$$

A curva resultante neste caso possui o mesmo range de vazão que as bombas primárias (Schneider, 2021), porém sua pressão está dobrada conforme a Figura 02 abaixo.

Figura 02 - Gráfico da Curva resultante de duas bombas iguais em Série

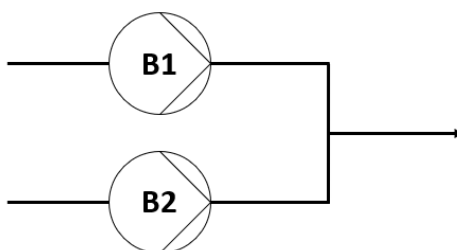


Fonte: Autor

2.11 Associação de Bombas Em Paralelo

A Associação de Bombas em Paralelo é o layout no qual duas ou mais bombas compartilham a mesma descarga com sucções independentes, conforme a Figura 03 que esquematiza o sistema:

Figura 03: Maquete de Associação de Bombas em Série.



Fonte: Autor

Comparado com o sistema em Série, se duas bombas ou mais estão acionadas em paralelo, o valor da pressão da curva resultante ocorrerá na faixa de pressão que

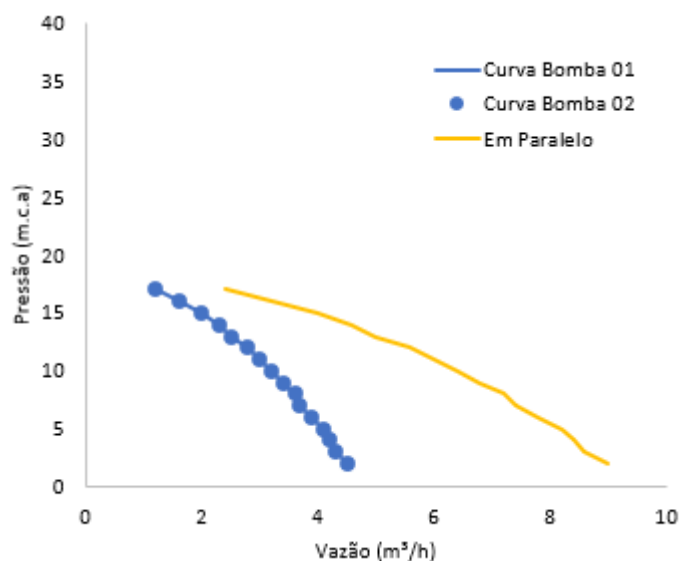
simultaneamente as duas bombas compartilham e suas vazões se somam (KSB, 2021). Para o caso de duas bombas iguais, as Equações 13 e 14 representam a interação das curvas das bombas primárias para gerar curva resultante.

$$P_T = P_I = P_{II} \quad (13)$$

$$Q_T = Q_I + Q_{II} \quad (14)$$

A Figura 04 apresenta um gráfico demonstrando a curva resultante da operação em paralelo.

Figura 04 - Gráfico da Curva resultante de duas bombas iguais em Paralelo.



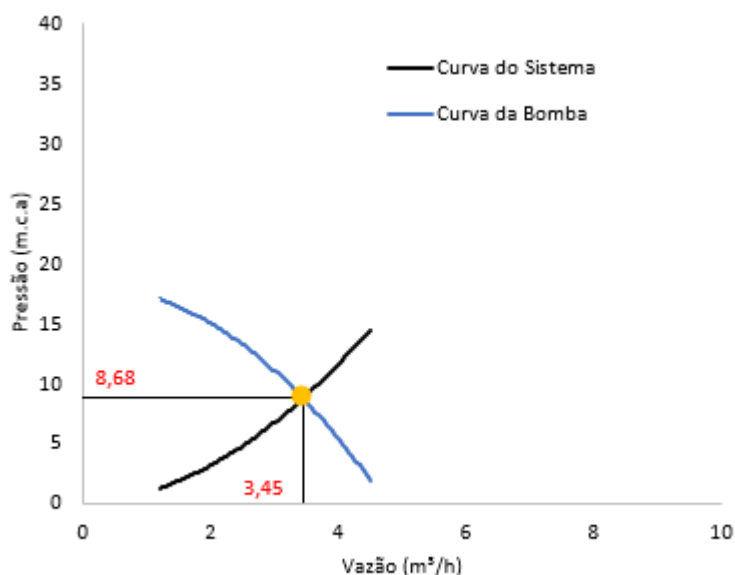
Fonte: Autor

2.12 Curva do Sistema e Ponto de Operação:

A pressão resultante em sistemas hidráulicos tubulares é uma função direta da vazão e do layout da tubulação. Aplicando-se a equação de Darcy-Weisbach (Equação 7) no range de vazão de uma motobomba em um sistema no qual se conhece o L_{eq}

comprimento equivalente da linha e acessórios (Equação 6), pode-se assim construir a curva de pressão em função da vazão (chamada de curva de sistema), possuindo as mesmas unidades que a curva da bomba. Desta forma, plotando-se simultaneamente ambas as curvas (curva da bomba x curva do sistema), como pode ser visto na Figura 05, é possível obter o ponto de operação através da intersecção destas.

Figura 05: Gráfico do cruzamento da Curva de uma bomba e seu respectivo sistema no range de vazão da bomba.



Fonte:Autor

No caso de haver ramificações de tubulação no sistema, deve-se considerar um cálculo de perda de carga para cada trecho que possua uma vazão, diâmetro ou rugosidade do tubo distinta, e desta forma somar o valor final para determinação da pressão resultante.

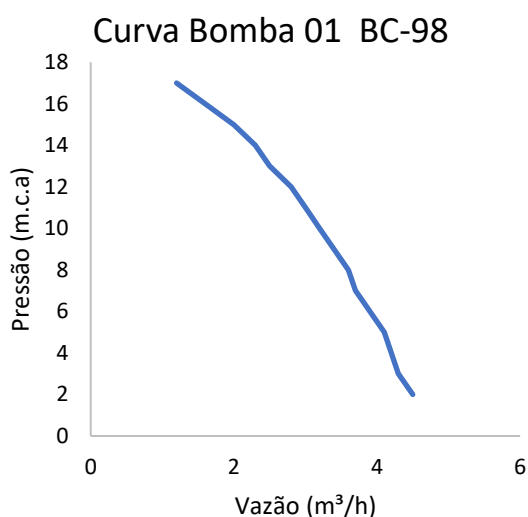
3. METODOLOGIA

3.1 Escolha da Motobomba e Layout

Em virtude de que o projeto seja de baixo custo, as duas bombas escolhidas foram as menores de uso doméstico no catálogo da fabricante Scheinder do ano de 2021, sendo o modelo BC-98, 1/3CV, rotor fechado em Noryl e pontos de operação coletados baseados na operação com água à temperatura ambiente. O formato dos dados também foi determinante para a escolha dessa fonte, sendo os dados fornecidos para a curva da bomba, como mostrado na Figura 06.

Figura 06: Pontos de Dados e Curva de Operação (m^3/h x mca) da Bomba BC-98 1/3CV.

(m^3/h)	(mca)
4,5	2
4,3	3
4,2	4
4,1	5
3,9	6
3,7	7
3,6	8
3,4	9
3,2	10
3	11
2,8	12
2,5	13
2,3	14
2	15
1,6	16
1,2	17
0	18



Fonte: Adaptado do Catálogo de Seleção Schneider 2021.

As dimensões da tubulação e os acessórios para o projeto de montagem do sistema foram escolhidos admitindo-se o material PVC com especificações de instalações residenciais para a dimensão de 1 polegada, conforme catálogo técnico Predial Água Fria Tigre. Os acessórios escolhidos estão listados na Tabela 03 abaixo e foram todos

desenhados em AUTOCAD, peça por peça, assim formando um banco de desenhos que foram utilizados para a composição do sistema.

Tabela 03 –Acessórios Componentes do Sistema.

Item	Descrição	DN (mm)	Qtd.
1	Válvula de Pé com Crivo	25	2
2	Registro de esfera	25	5
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	25	17
4	Curva 45° de PVC	25	2
5	Motobomba Centrífuga 1	25	1
6	Motobomba Centrífuga 2	25	1
7	Tê de PVC	25	3
8	Medidor de Pressão	n/a	5
9	Medidor de vazão	n/a	5
10	Reservatório	n/a	1

Fonte: Autor

A motobomba do desenho foi escolhida mediante a disponibilidade de desenhos em CAD do fabricante Grundfos (Grundfos, 2021), que disponibiliza desenhos em CAD online, sendo neste projeto de caráter ilustrativo.

A partir do desenho, foram obtidas as medições precisas do layout que a tubulação eventualmente poderá vir a ter, assim conseguindo definir o valor do Comprimento Equivalente e Comprimento Total do sistema. Na Tabela 04, há as medidas para todos os modos de operação.

Tabela 04–Comprimentos Totais para os modos de operação.

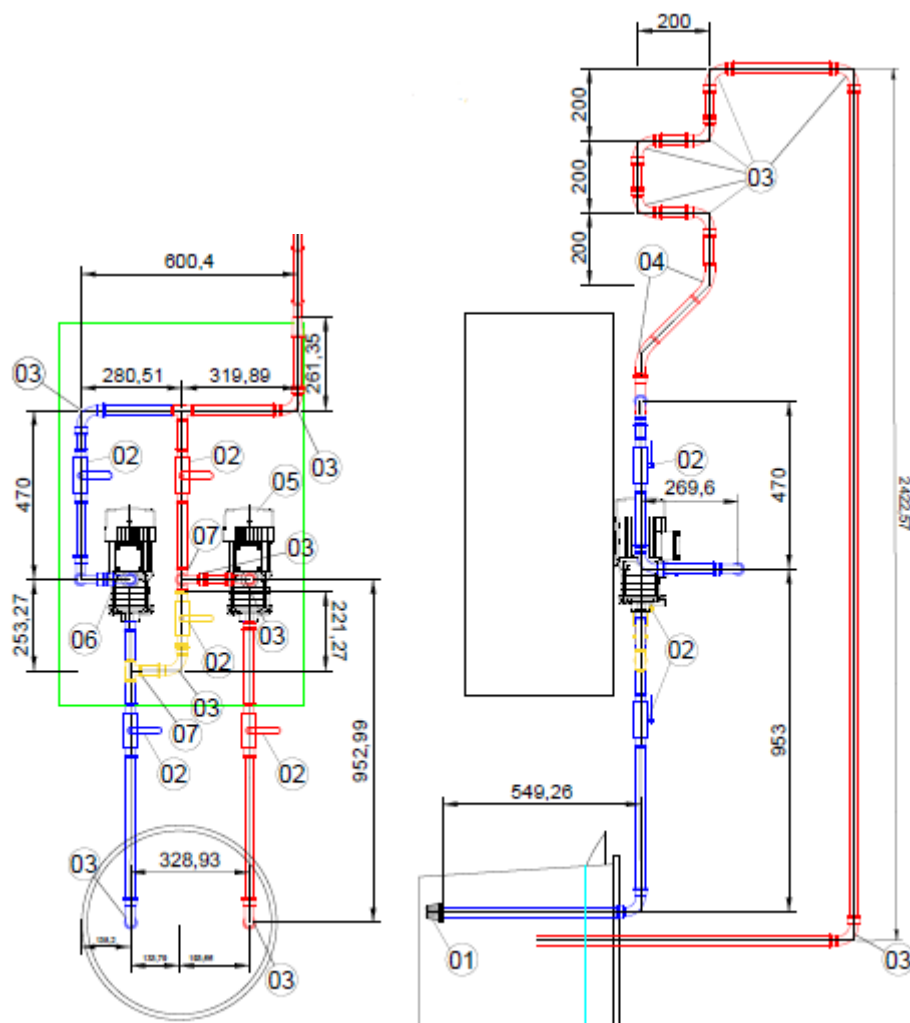
Descrição	L total. (m)
Bomba 1 Solo	42,8
Bomba 2 Solo	46,0
Bombas 1 e 2 Série	51,8

Fonte: Autor

O layout escolhido, conforme a Figura 07, permite a operação em 04 modos diferentes, sendo estes: Bomba 01 solo, Bomba 02 Solo, Bombas em Série e Bombas em Paralelo. Foi feita a modelagem matemática dos 04 modos de trabalho considerando duas bombas modelo BC-98 e utilizando os modelos de Darcy-

Weisbach (Equação 07) e do Método do Comprimento Equivalente (Equação 06) para cálculo de Curva do sistema.

Figura 07: Esquema de conexão das bombas, válvulas e acessórios - layout do projeto. cotas em mm.



Fonte: Autor

3.2 Medidas dos 04 Modos de operação

Uma vez com os desenhos prontos, é necessário tabelar todos os comprimentos dos trechos do sistema e seus respectivos comprimentos equivalentes de acessórios, sendo esses dados apresentados no ANEXOS 1 ao 10.

Somando o valor do comprimento L do trecho e os comprimentos equivalentes de cada acessório, foi possível obter o resultado do comprimento total para cada modo de operação, conforme apresentado na Tabela 04.

3.3 Parâmetros Constantes

Para este trabalho, o produto bombeado escolhido foi a água e os parâmetros utilizados nas equações estão descritos na Tabela 05 abaixo:

Tabela 05 –parâmetros e constantes utilizados no projeto.

Dados	Valor	Unidade
D	0,025	m
g	9,81	m/s ²
Área	0,00049087	m ²
ϵ	0,00004572	m
ϵ/D	0,0018288	-
Densidade	1000	kg/m ³
Viscosidade	0,001	Pa.s

Fonte: Autor

3.4 Método de Cálculo

Para o cálculo do ponto de operação (Vazão x Pressão) dos modos de trabalho escolhidos, faz-se necessário calcular a curva do sistema por meio da coleta dos seguintes conjuntos de dados e aplicando-os na equação de Darcy-Weisbach (Equação 7):

1. Dados da Curva de Operação da Bomba: Vazão x Pressão.
2. Comprimento total de tubo que o fluído irá percorrer.
3. Comprimento equivalente dos acessórios e componentes do layout.
4. Dados da composição físico-química do produto bombeado, neste caso a água.

Nos casos dos modos de operação Bomba 1 Solo e Bomba 2 Solo, as curvas características das bombas serão as mesmas tendo em vista que as bombas escolhidas foram idênticas. No entanto, para os casos de bombas em série e bombas

em paralelo, faz-se necessário uma etapa extra de cálculo das curvas resultantes das associações em Série e Paralelo, aplicando-se as Equações 11 e 12 para cada ponto de operação do Modo em Série e as Equações 13 e 14 para o Modo em Paralelo.

A próxima etapa de cálculo é a Curva do Sistema a qual necessita dos valores do range de vazão da Curva Resultante da Bomba, comprimento total da tubulação, comprimento equivalente de acessórios e dados da composição do fluido. Todos esses dados foram alimentados em uma planilha Excel e automatizada para efetuar os cálculos da equação de Darcy-Weisbach e retornar um conjunto de pontos da perda de carga resultante da vazão que a bomba fornece, sendo esses pontos calculados os pontos de geração da Curva do Sistema.

Para cada ponto de Vazão que a Curva da bomba pode fornecer ao sistema, o procedimento de cálculo foi executado seguindo, em ordem, as Equações 15 a 18:

$$v_i = \frac{Q_i/3600}{\left(\frac{\pi * D^2}{4}\right)} \quad (15)$$

$$Re_i = \frac{\rho * v_i * D}{\mu} \quad (16)$$

$$\frac{1}{\sqrt{Cf_i}} = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3,7} * \frac{2,51}{Re_i * \sqrt{Cf_i}} \right) \quad (17)$$

$$h_i = Cf_i * \frac{L + Leq}{D} * \frac{v_i^2}{2g} \quad (18)$$

A Equação 15 é a conversão da vazão em m³/h em velocidade de escoamento em m/s. Com o valor da velocidade, é possível encontrar o número de Reynolds através da Equação 16. A resolução da equação de Colebrook, que é uma equação algébrica não-linear, foi feita a partir da elaboração de um código computacional em VBA descrito no ANEXO 15, e a função de chamada no Excel Possui a sintaxe:

=FactorAtrit($Re; \varepsilon / D$)

Sendo:

Re: Número de Reynolds.

ε/D : Rugosidade sobre o diâmetro do tubo.

A última etapa de cálculo é feita a partir dos parâmetros v e Cf obtidos nos cálculos anteriores, juntamente com os parâmetros de medidas do sistema, todos estes valores sendo substituídos na equação de Darcy Weisbach e obtendo-se os pontos respectivos da perda de carga.

O processo deverá ser repetido para trechos de tubulação que possuam vazões distintas, ou outras variáveis (como diâmetro do tubo) que afetem o resultado dos cálculos do modelo citado. Esse modo de cálculo será abordado nos resultados e discussões do modelo de operação em Paralelo.

Uma vez com o conjunto de pontos da curva da bomba e com o conjunto de pontos da Curva do Sistema, para a obtenção do ponto de operação, foi implementado no Excel uma regressão polinomial variável no qual o usuário poderá escolher um polinômio de grau 2 a 6 que melhor se ajusta às respectivas curvas. Por fim, utilizando a ferramenta Solver do Excel, é possível fazer o cruzamento dos dois polinômios e obter o ponto de operação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

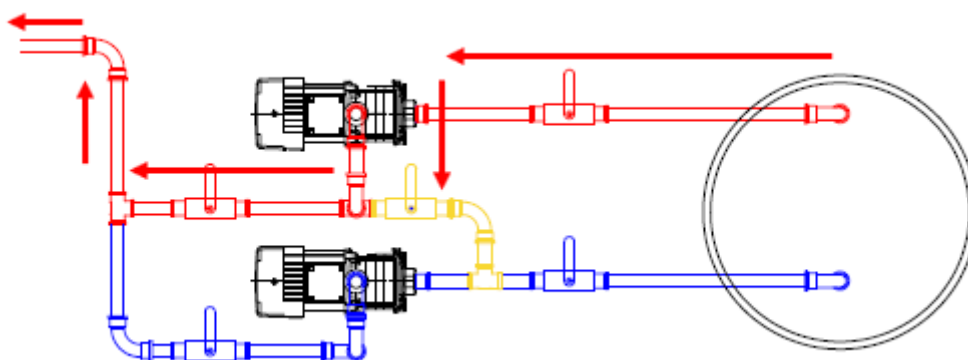
4.1 Operação de Bomba 01 Solo e Bomba 02 Solo

Por mais que sejam duas bombas iguais, a justificativa da elaboração do modelo de cálculo para a Bomba 02 Solo está na pequena diferença do comprimento de tubulação e acessórios em comparação ao sistema da Bomba 01 solo, sendo assim será possível mediante a simulação dos dados averiguar a diferença do valor da pressão resultante de um mesmo modelo de bomba em dois sistemas diferentes, porém muito similares.

A principal diferença entre os dois modelos está no valor do comprimento de tubulação e comprimento equivalente resultantes devido ao layout escolhido.

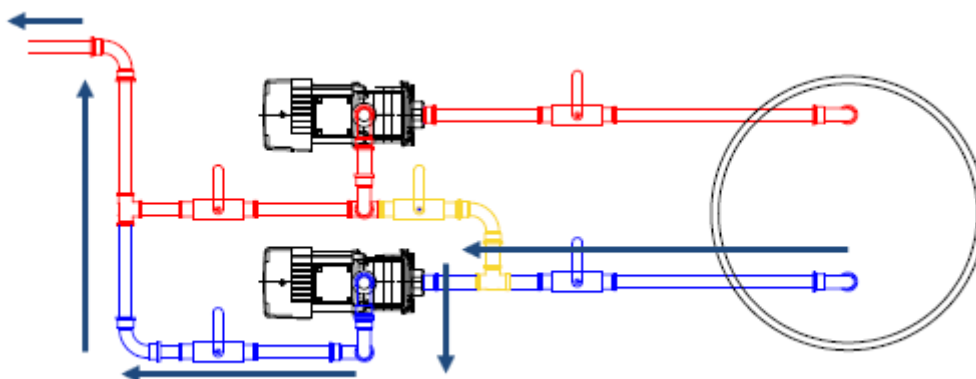
Abaixo segue esquema de setas nas Figuras 08 e 09 demonstrando as diferenças de layout nos modos de operação Bomba 01 Solo representada na cor Vermelha e a Bomba 02 Solo representada pela cor azul.

Figura 08 – Representação sentido do Fluxo para operação da Bomba 01 Solo, em vermelho.



Fonte: Autor

Figura 09 – Representação do Fluxo para operação da Bomba 02 Solo, em Azul.



Fonte: Autor

As medidas nos comprimentos dos tubos e a presença de diferentes acessórios resultará em uma curva do Sistema diferente se comparada a simulação anterior.

Para os Modos de Operação Bomba 01 Solo e Bomba 02 Solo, foi listado a partir dos desenhos dos ANEXOS 01, 02, 05 e 06 os componentes do modo de operação e os comprimentos equivalentes dos componentes que terão fluxo do fluido, demonstrados nas Tabelas 06 a 08.

Tabela 06- Lista de Itens e Comprimentos equivalentes totais para configuração de Bomba 01 Solo.

Item	Descrição	Qtd.	Leq (m)	Leq Total (m)
1	Válvula de Pé com Crivo	1	13,3	13,3
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	11	1,5	16,5
2	Registro de esfera	2	0,3	0,6
4	Curva 45° de PVC	2	0,4	0,8
7	Tê de PVC	2	0,9	1,8

Fonte: Autor

Tabela 07 - Lista de Itens e Comprimentos equivalentes para configuração de Bomba 02 Solo.

Item	Descrição	Qtd.	Leq (m)	Leq Total (m)
1	Válvula de Pé com Crivo	1	13,3	13,3
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	13	1,5	19,5
2	Registro de esfera	2	0,3	0,6
4	Curva 45° de PVC	2	0,4	0,8
7	Tê de PVC	2	0,9	1,8

Fonte: Autor

Os valores de Ltotal que serão necessários para o cálculo da perda de carga podem ser acompanhados na Tabela 08 abaixo.

Tabela 08 – Tabela de dados de comprimento total para os Sistemas Bomba 01 Solo, Bomba 02 solo e Bombas em Série.

Descrição	Comprimento de Tubo (m)	Leq (m)	Ltotal (m)
Bomba 1 Solo	9,8	33,0	42,8
Bomba 2 Solo	10,0	36,0	46,0
Associação em Série	10,1	41,7	51,8

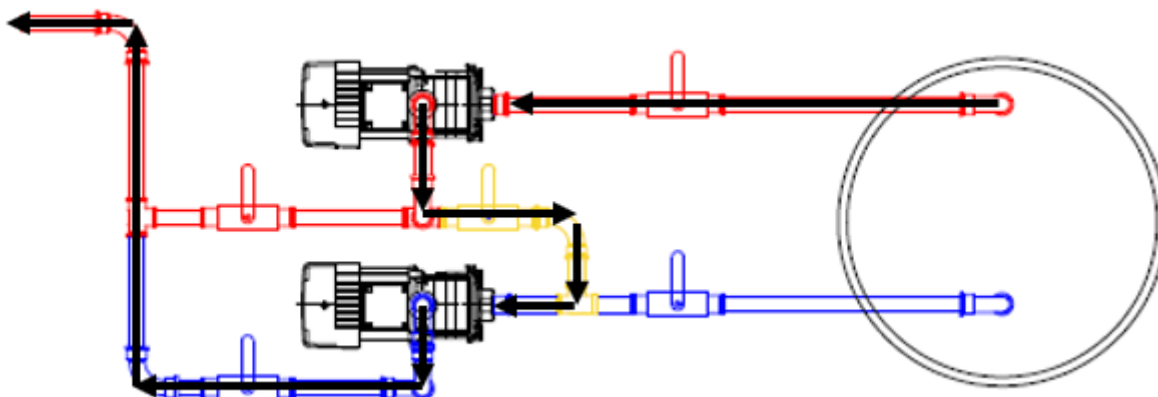
Fonte: Autor

4.2 Associação de Bombas em Série

Diferente dos modelos anteriores, uma etapa extra de cálculo deverá ser feita, sendo o cálculo da curva resultante da Associação de bombas, neste caso em série.

Conforme esquema representado na Figura 10, a vazão que entra no sistema é somente da Bomba 01 que alimenta a sucção da Bomba 02. A disposição de quais válvulas devem estar abertas e fechadas estão contidas no desenho do ANEXO 07.

Figura 10 – Representação do Fluxo para operação das bombas em Série, na cor preta.



Fonte:Autor

Para os Modo de Operação Bombas em série, foi listado a partir dos desenhos do ANEXO 03 os componentes do modo de operação e os comprimentos equivalentes dos componentes que terão fluxo do fluido, demonstrados na Tabela 09.

Tabela 09 - Lista de Itens e Comprimentos equivalentes totais para configuração de Bombas em Série.

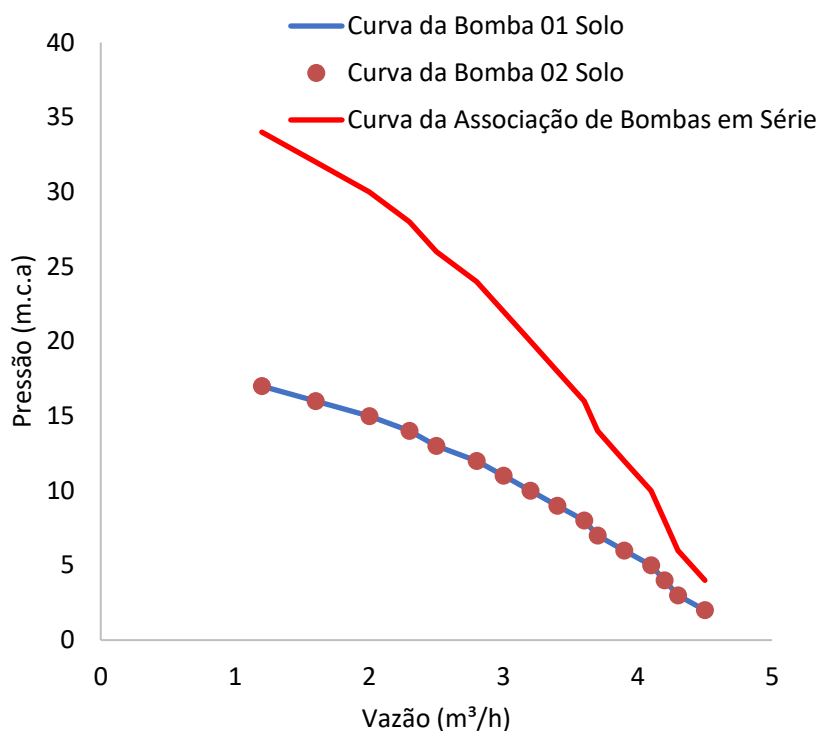
Item	Descrição	Qtd.	Leq (m)	Leq Total (m)
1	Válvula de Pé com Crivo	1	13,3	13,3
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	16	1,5	24
2	Registro de esfera	3	0,3	0,9
4	Curva 45° de PVC	2	0,4	0,8
7	Tê de PVC	3	0,9	2,7

Fonte: Autor

Neste caso de associação em série, para cada ponto de operação da Bomba primária, é possível calcular um novo ponto resultante, de acordo com as Equações 11 e 12.

O gráfico resultante da operação dos sistemas Bomba 01 solo e Bomba 02 Solo são os mesmos, pois as bombas são idênticas. Porém, no caso da Associação em Série, pode-se observar através da Figura 11 um comparativo das Curvas Resultantes das Bombas para as 03 configurações mencionadas.

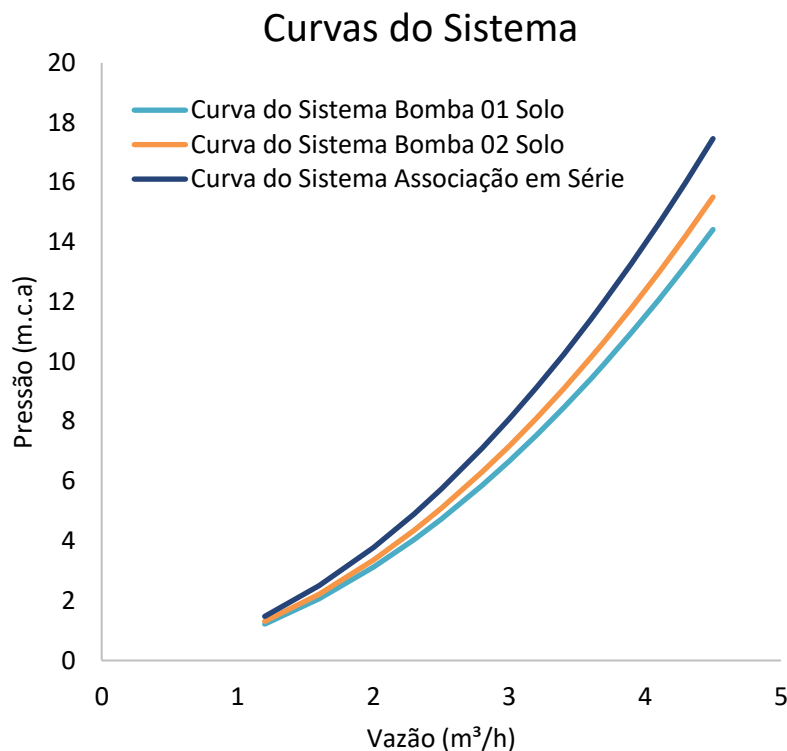
Figura 11 – Gráfico contendo as 03 Curvas de Operação das bombas nos modos Bomba 01 Solo, Bomba 02 Solo e Associação em Série.



Fonte: Autor

Por mais que a curva resultante da associação em série possua a pressão dobrada, a sua vazão se mantém constante. Sendo assim, os valores do range de vazão disponíveis para o cálculo dos pontos da perda de carga são os mesmos dos sistemas Bomba 01 Solo e Bomba 02 Solo. Como demonstrado nos dados da Tabela 08, a diferença está mais uma vez no comprimento do layout e a presença de elementos que aumentem o valor do comprimento equivalente. Por mais que a associação de bombas em série permita que as duas em operação consigam uma curva associada que alcança o dobro de pressão, a variável que controla o valor da pressão do sistema é somente a vazão. Sendo assim, uma pequena variação no formato da curva do sistema da Associação em Série será similar às curvas dos sistemas de Bomba 01 Solo e Bomba 02 Solo conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Gráfico Curvas Resultantes dos 3 Sistemas.

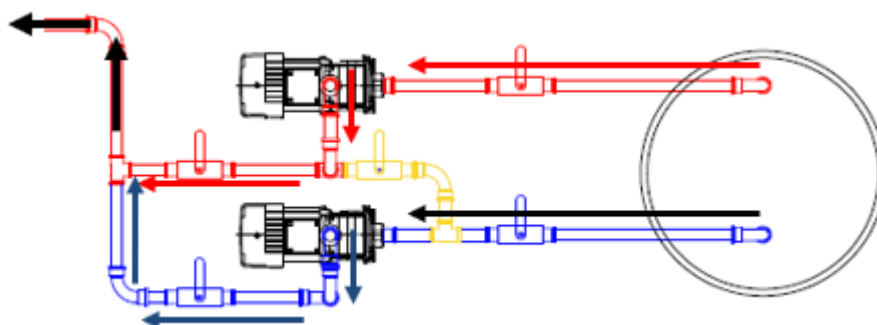


Fonte: Autor

4.3 Associação de Bombas em Paralelo.

Na associação de bombas em paralelo, cada bomba possui sucção independente e a descarga de ambas as bombas irão se unir em algum ponto ao longo da tubulação. A principal diferença entre os modelos anteriores é que são duas bombas simultâneas alimentando o sistema, diferente dos 3 modelos anteriores que somente 01 bomba alimentava o sistema. Na Figura 13, demonstra-se o sentido de fluxo adotado para operação em paralelo. As setas em vermelho indicam o trecho no qual há somente o fluxo da Bomba 01, em azul indicando o trecho de somente fluxo da Bomba 02 e em preto o trecho onde há a soma dos fluxos.

Figura 13 – Representação do Fluxo para operação das bombas em Paralelo.



Fonte: Autor

Para o Modo de Operação Bombas em Paralelo, diferente dos outros modelos abordados anteriormente, há de se fazer 03 vezes os cálculos descritos na metodologia deste trabalho, um para cada um dos 3 trechos que possuem condições de operação distintas, no caso a Vazão. Sendo assim, será obtido 03 valores de perda de carga, sendo que no final, haverá a soma das perdas resultantes dos 3 trechos.

Trecho 01: Escoamento da sucção da bomba 01 até o ponto de União dos fluxos, a vazão da Bomba 01 será determinante para o cálculo da perda de carga no trecho.

Trecho 02: Escoamento da sucção da bomba 02 até o ponto de União dos fluxos, a vazão da Bomba 02 será determinante para o cálculo da perda de carga no trecho.

Trecho 03: Escoamento após a união dos fluxos.

Para cada trecho foi listado, a partir do desenho do ANEXOS 03 e 08, os componentes de cada um dos 03 trechos e os comprimentos equivalentes dos componentes que terão fluxo do fluido, demonstrados nas Tabelas 10 a 12.

Tabela 10 – Lista de Itens e Comprimentos equivalentes totais para o Trecho 01 da Associação em Paralelo.

Item	Descrição	Qtd.	Leq (m)	Leq Total (m)
1	Válvula de Pé com Crivo	1	13,30	13,3
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	3	1,50	4,5
7	Tê de PVC	1	0,90	0,9
2	Registro de esfera	2	0,30	0,6

Fonte: Autor

Tabela 11 – Lista de Itens e Comprimentos equivalentes totais para o Trecho 02 da Associação em Paralelo.

Item	Descrição	Qtd.	Leq (m)	Leq Total (m)
1	Válvula de Pé com Crivo	2	13,30	26,6
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	5	1,50	7,5
7	Tê de PVC	2	0,90	1,8
2	Registro de esfera	2	0,30	0,6

Fonte: Autor

Tabela 12 – Lista de Itens e Comprimentos equivalentes totais para o Trecho 03 da Associação em Paralelo.

Item	Descrição	Qtd.	Leq (m)	Leq Total (m)
7	Tê de PVC	1	0,90	0,9
4	Curva 45° de PVC	2	0,40	0,8
3	Joelho 90° de PVC Curva Longa	8	1,50	12,0

Fonte: Autor

Os valores de Ltotal que serão necessários para o cálculo da perda de carga podem ser acompanhados na Tabela 13.

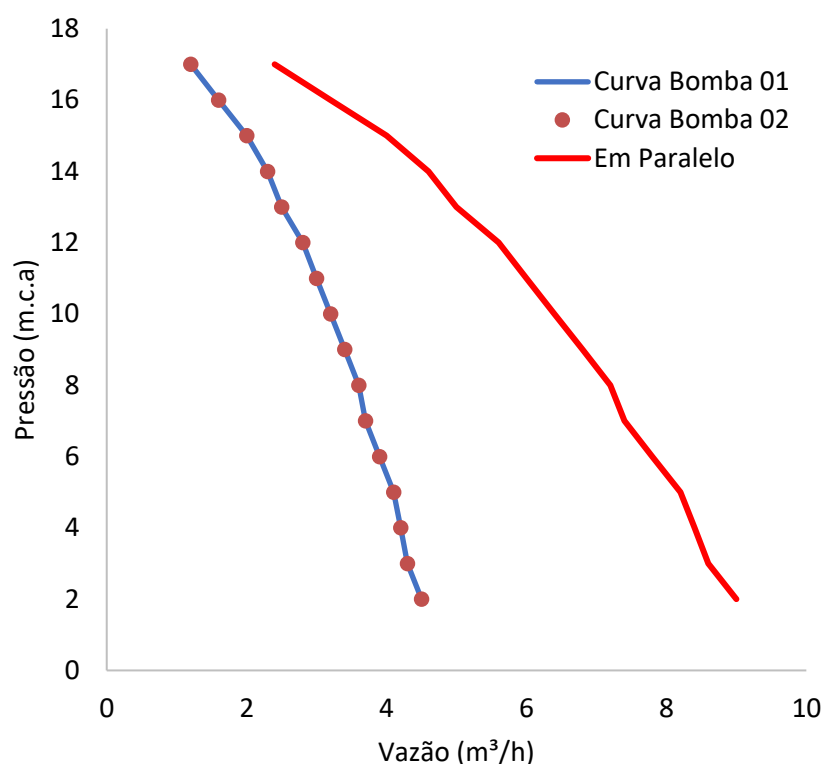
Tabela 13 – Tabela de dados de comprimento total para o modo Associação em Paralelo.

Descrição	Comprimento de Tubo (m)	Leq (m)	Ltotal (m)
Trecho 01	2,71	19,3	22,01
Trecho 02	2,93	36,5	39,43
Trecho 03	5,55	13,7	19,25

Fonte: Autor

A curva resultante da Associação das bombas em paralelo pôde ser obtida aplicando-se as Equações 13 e 14 nos pontos da curva da bomba BC-98, como pode ser visto na Figura 14:

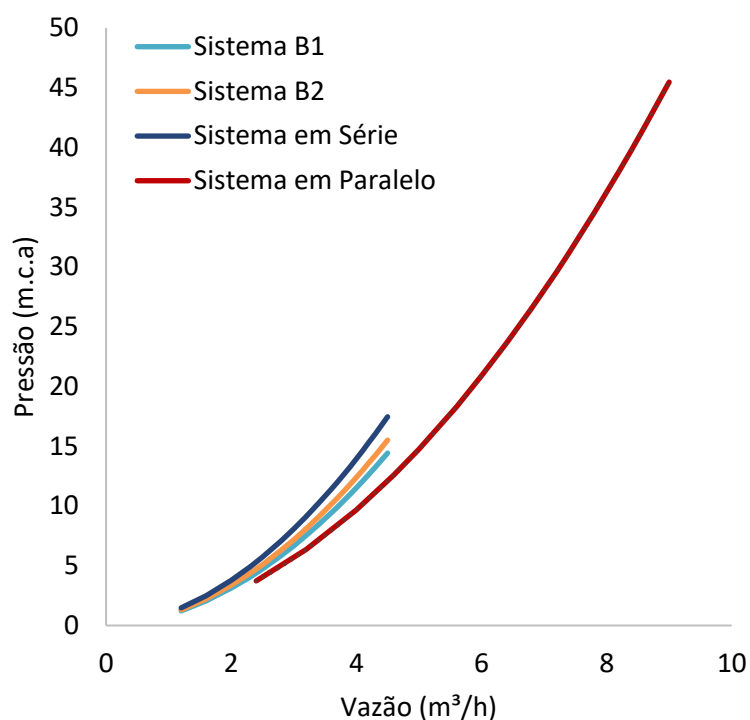
Figura 14 – Gráfico contendo as 03 Curvas de Operação das bombas nos modos Bomba 01 Solo, Bomba 02 Solo e Associação em Paralelo.



Fonte: Autor

Por fim, com os pontos respectivos das vazões para operação em Paralelo, pode-se efetuar os cálculos e encontrar os valores das 3 perdas de cargas para cada um dos trechos e por fim somá-los, obtendo os pontos da curva do sistema. Como pode ser visto na Figura 15, comparando-se com os outros modelos, a grande discrepância no tamanho da curva do sistema em paralelo em relação as outras está diretamente relacionada ao dobro do potencial de vazão.

Figura 15 – Gráfico Curvas Resultantes dos 4 Sistemas.



Fonte: Autor

4.4 Cruzamento das curvas

Através da implementação de uma regressão polinomial usando Excel tanto nos pontos das curvas resultantes das bombas como nas curvas dos respectivos sistemas, foi possível a obtenção dos polinômios que melhor ajustam os pontos de operação. Com o cruzamento das curvas através do cálculo com o Solver/Excel, foi possível obter o valor final esperado para a operação em estado estacionário de cada um dos 04 Modelos deste trabalho, como apresentado na Tabela 14 e nas Figuras 16 a 20.

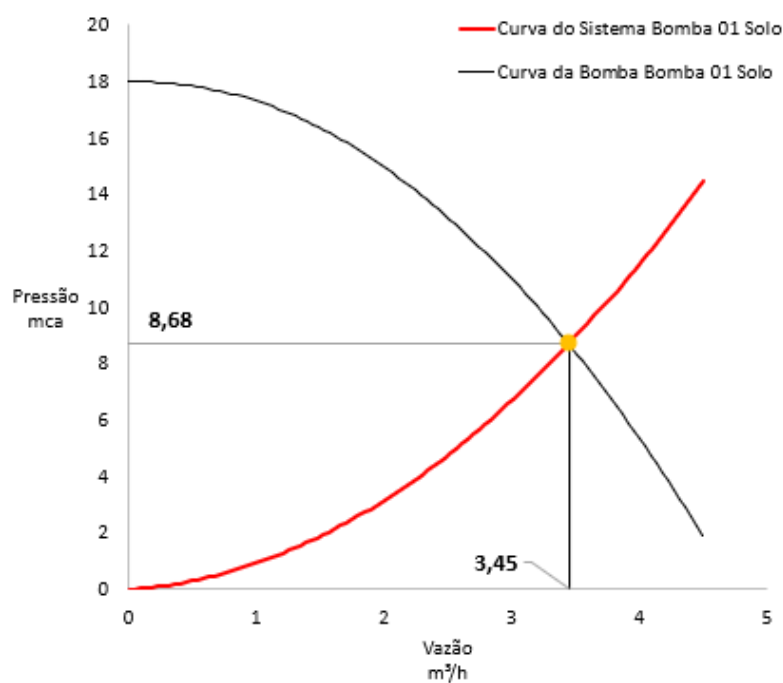
Tabela 14 – Ponto nominal de Operação para os 04 Sistemas.

Modo de Operação	Vazão (m ³ /h)	Pressão (mca)
Bomba 01 Solo	3,45	8,68
Bomba 02 Solo	3,38	9,02
Associação em Série	3,83	12,85
Associação em Paralelo	4,79	13,6

Fonte: Autor

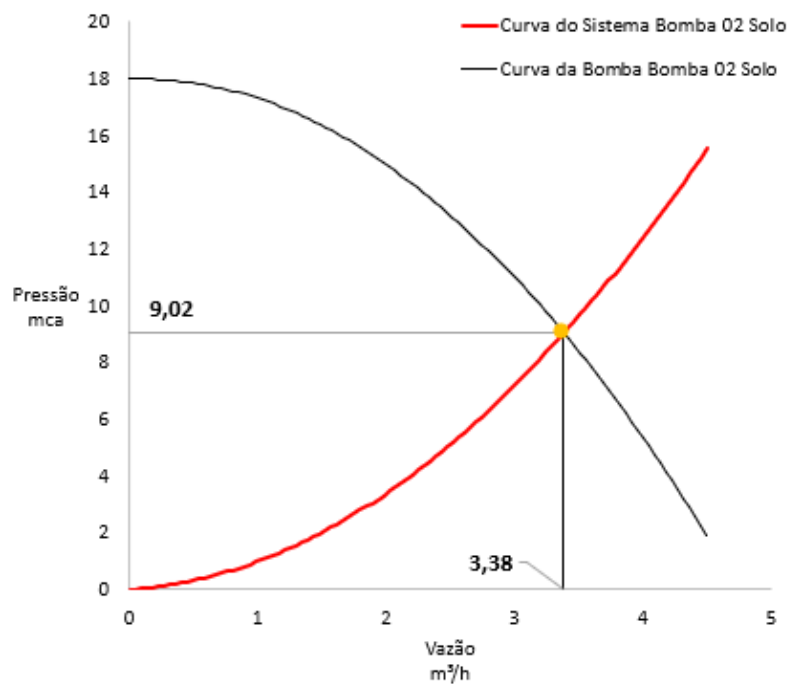
Figura 16 – Gráfico do Cruzamento da Curva da Bomba 01 com o Sistema Bomba 01 Solo.

Fonte: Autor



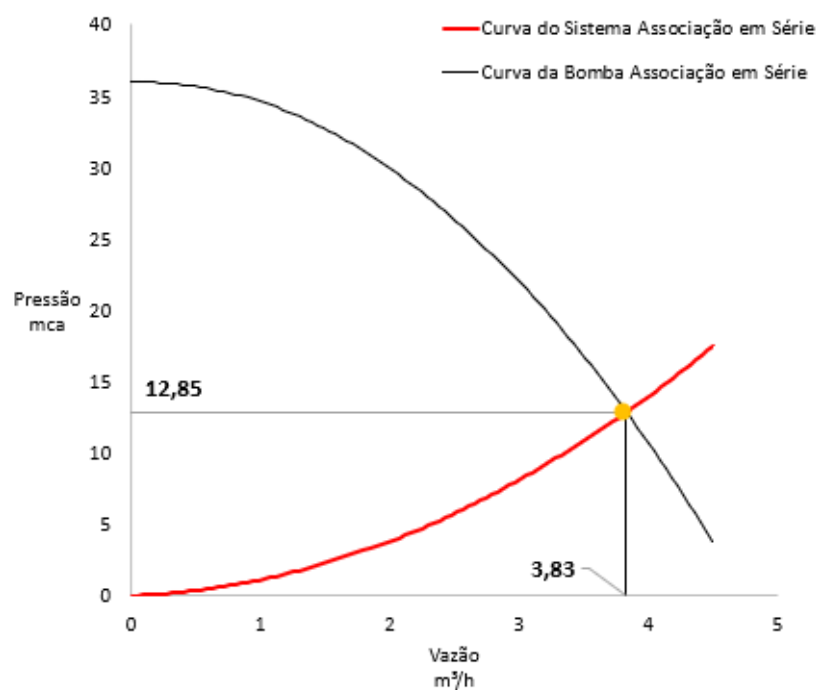
Fonte: Autor

Figura 17 – Gráfico do Cruzamento da Curva da Bomba 02 com o Sistema Bomba 02 Solo.



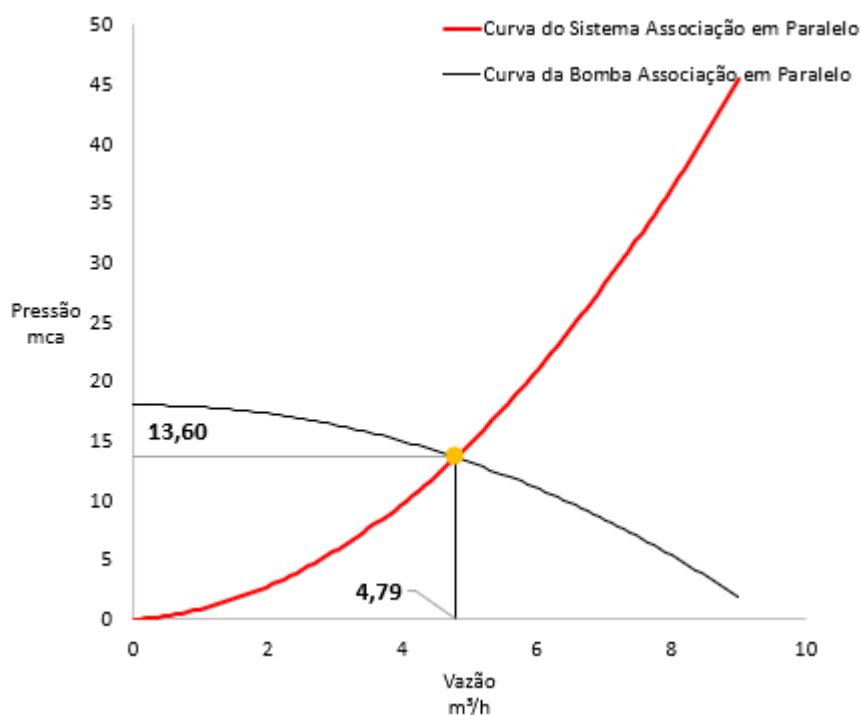
Fonte: Autor

Figura 18 – Gráfico do Cruzamento da Curva da Associação em Série com a Curva do Sistema em Série.



Fonte: Autor

Figura 19 – Gráfico do Cruzamento da Curva da Associação em Paralelo com a Curva do Sistema em Paralelo.



Fonte: Autor

4.5 NPSH

Todo o sistema projetado, tanto na sucção como na descarga possuem o mesmo diâmetro, sendo 25mm (1 polegada). No entanto, a recomendação de instalação para a sucção de bombas centrífugas é que a sucção possua um diâmetro maior que na descarga, os valores do NPSH para as condições do projeto foram obtidos com o auxílio da Planilha Automatizada e os dados da Curva do NPSHr do modelo de bomba em análise BC-98 1/3 CV.

Tabela 15– Dados de NPSHr para a bomba BC-98.

Vazão m³/h	NPSHr (m)
0,02405	1,2086
0,28858	1,0935
0,55311	1,036
0,79359	1,036
1,0701	1,0935
1,491	1,2662
2,008	1,6691
2,4409	2,1871
2,8377	2,7626
3,1743	3,3381
3,6313	4,259
3,9319	4,9496
4,2084	5,6403
4,5571	6,5612

Schneider, 2021

Os cálculos da perda de carga da sucção utilizam do mesmo método que foi abordado anteriormente para o cálculo da pressão total de projeto, para isso fez-se necessário listar os valores das medidas dos comprimentos das sucções e comprimentos equivalentes de acessórios para as bombas 01 e 02 são descritos na tabela abaixo:

Tabela 15 – Dados do layout da sucção para as duas bombas.

Descrição	Comprimento de Tubo (m)	Leq (m)	Ltotal (m)
Sucção Bomba 01	1,502	14,8	16,302
Sucção Bomba 01	1,502	15,7	17,202

Fonte: Autor

Com os valores dos pontos de operação (vazão e pressão), comprimentos totais e equivalentes, podemos aplicar as equações 15, 16, 17 e 18 e obter o valor da perda de carga h nos trechos das sucções das bombas 01 e 02 nos quatro modos de operação.

Tabela 16 – Perda de Carga na sucção das Bombas

Modo de Operação	Vazão (m³/h)	Perda de Carga sucção (mca)
Bomba 01 Solo	3,45	6,618
Bomba 02 Solo	3,38	6,750
Associação em Série	3,83	8,091
Associação em Paralelo B1	2,395	3,334
Associação em Paralelo B2	2,395	3,518

Fonte: Autor

A partir dos valores da vazão, traçando no ponto de operação de cada bomba, foram obtidos os valores de NPSHr.

Tabela 17 – Valores do NPSHr

Modo de Operação	Vazão (m³/h)	NPSHr (mca)
Bomba 01 Solo	3,45	3,86
Bomba 02 Solo	3,38	3,74
Associação em Série	3,83	4,70
Associação em Paralelo B1	2,395	2,12
Associação em Paralelo B2	2,395	2,12

Fonte: Autor

Para a sucção o desnível geométrico do nível do líquido até a linha de centro das bombas foi de 10 cm = 0,10m.

Os parâmetros de Pressão de vapor da água e pressão atmosférica utilizados estão demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Pressão de Vapor e Pressão atmosférica em mca.

Descrição	Pressão (mca)
Pressão Atmosférica	10,33
Pressão de Vapor @ água 30°C	0,4385

Fonte: Engineering ToolBox

Em posse dos valores das perdas de carga, desnível geométrico, NPSHr, pressões de vapor e atmosféricas e mca, foi possível calcular o valor do NPSHd e NPSH, utilizando as equações 8 e 9.

Tabela 19 – NPSHd e NPSH

Modo de Operação	NPSHd (mca)	NPSH (mca)
Bomba 01 Solo	3,176	-0,339
Bomba 02 Solo	3,044	-0,692
Associação em Série	1,703	-2,997
Associação em Paralelo B1	6,460	4,339
Associação em Paralelo B2	6,276	4,155

Fonte: Autor

Pôde-se notar que os Modos de operação Bomba 01 Solo, Bomba 02 Solo e Bombas em série cavitam, e o modo em Paralelo não. A análise que pode ser feita a partir destes resultados é que o modo de operação em Paralelo não cavitou devido que a vazão de cada bomba é a metade da vazão do Modo em Paralelo, e devido a isso o valor do NPSHr é consideravelmente menor, além da menor perda de carga que são valores dependente da vazão.

Em virtude de verificar o melhor ponto de operação sem cavitação, uma nova simulação mantendo os mesmos dados e somente modificando o valor do diâmetro na sucção de 0,025 m para 0,0375 m, foram obtidos os novos pontos de operação e NPSH.

Tabela 20 – Dados de Operação para diâmetro de sucção = 0,0375 m

Modo de Operação	Vazão (m ³ /h)	Pressão (mca)	h sucção (mca)	NPSHr	NPSH
Bomba 01 Solo	3,76	6,86	1,614	4,538	3,64
Bomba 02 Solo	3,70	7,21	1,654	4,405	3,74
Associação em Série	4,03	10,29	1,840	5,184	2,77
Associação em Paralelo B1	2,63	12,67	0,827	2,435	6,53
Associação em Paralelo B2	2,63	12,67	0,873	2,435	6,49

Fonte: Autor

4.6 POTÊNCIA HIDRÁULICA

A potência hidráulica fornece uma noção do tamanho do motor e carga que uma bomba deverá possuir para vencer as perdas de carga e desnível geométrico do sistema, para o projeto em questão, considerando a operação com diâmetro de recalque 0,025 m e diâmetro na sucção de ambas as bombas de 0,0375 m, aplicando a equação 10 nos pontos de operação foram obtidos os seguintes valores para potência hidráulica dos 04 Modos de operação:

Tabela 21 – Potência Hidráulica Para todos os Modos

Modo de Operação	Vazão (m ³ /h)	Pressão (mca)	P Hidráulica (W)
Bomba 01 Solo	3,76	6,86	70,25
Bomba 02 Solo	3,70	7,21	72,74
Associação em Série	4,03	10,29	113,09
Associação em Paralelo B1	2,63	12,67	90,68
Associação em Paralelo B2	2,63	12,67	90,68

Fonte: Autor

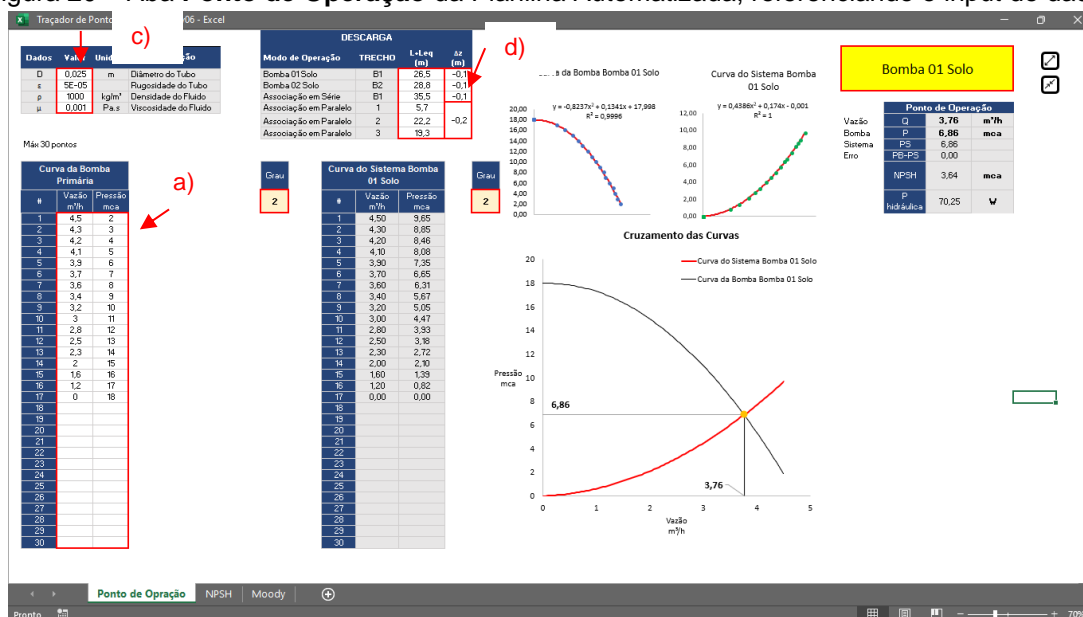
4.6 PLANILHA AUTOMATIZADA

As entradas de dados necessárias para a especificação do sistema são:

- Curva de operação da Bomba (vazão x pressão);
- Curva de NPSHr (vazão x NPSHr)
- Parâmetros constantes do sistema
- Medidas dos comprimentos totais e equivalentes de acessórios para sucção e descarga.

A planilha possui 03 abas, cada uma com uma função específica. A primeira página está nomeada como Ponto de Operação, e apresenta dados gerais e principais sobre os 04 modos de operação, na figura abaixo podemos ver a primeira página da planilha:

Figura 20 – Aba **Ponto de Operação** da Planilha Automatizada, referenciando o input de dados

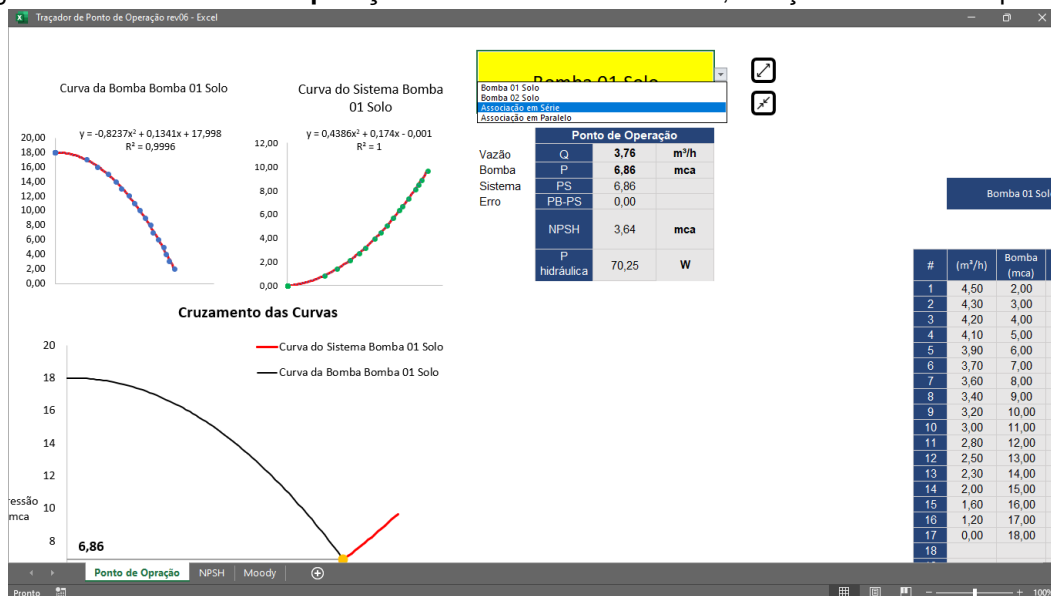


Fonte: Autor

As caixas em vermelho são os locais reservados para preenchimento com os dados do sistema, na curva da bomba há espaço para até 30 pontos, nesta primeira página, os dados das medidas do sistema adicionados são referentes à descarga das bombas, os dados da sucção são adicionados na aba NPSH, uma vez que estes dados são determinantes para o cálculo do NPSH. Na figura abaixo, no quadro em

amarelo pode-se seleccionar qual dos modos de operação deseja-se verificar os dados através da seleção de uma lista suspensa.

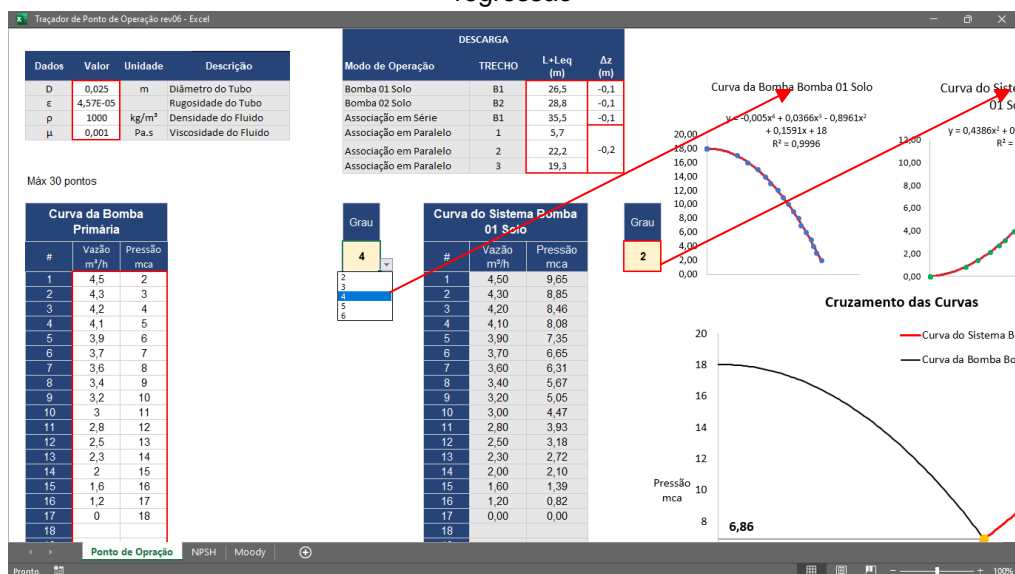
Figura 21 – Aba **Ponto de Operação** da Planilha Automatizada, seleção do modo de operação



Fonte: Autor

Os quadros abaixo das caixas com o nome grau, pode-se escolher o grau do polinômio que melhor representar a regressão dos dados tanto da curva da bomba (ou curva resultante) como da curva do sistema.

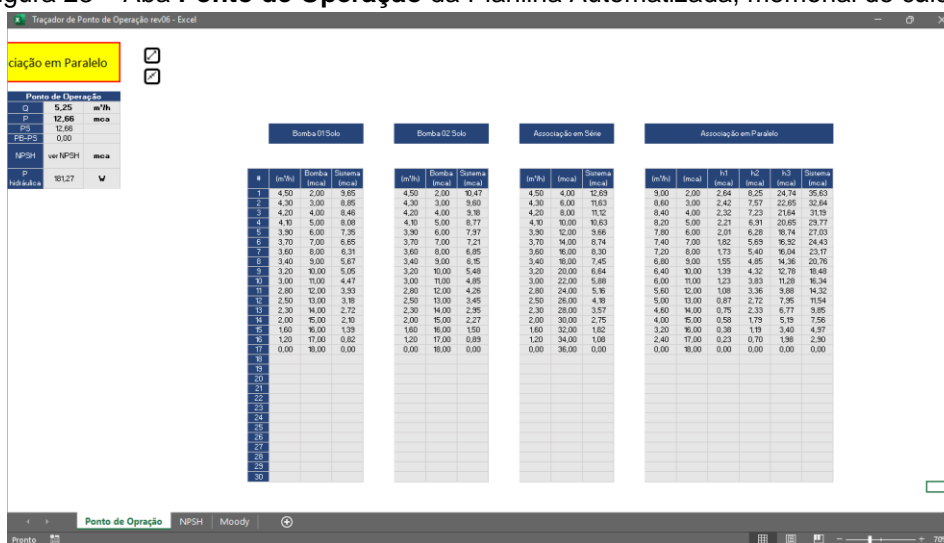
Figura 22 – Aba **Ponto de Operação** da Planilha Automatizada, seleção do grau do polinômio da regressão



Fonte: Autor

Ao lado direito do gráfico de cruzamento das curvas, temos algumas tabelas do memorial de cálculo de todas as curvas:

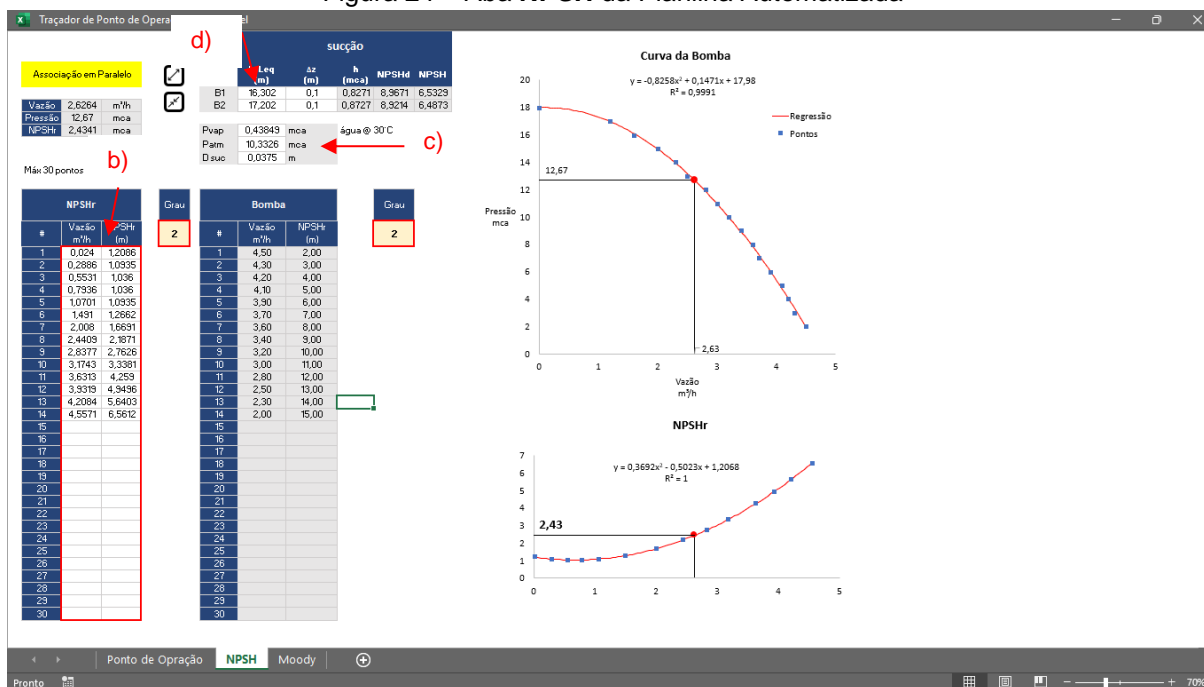
Figura 23 – Aba **Ponto de Operação** da Planilha Automatizada, memorial de cálculo



Fonte: Autor

Na segunda página NPSH temos os seguintes campos para preenchimento de mesma forma da aba anterior nos quadros em vermelho:

Figura 24 – Aba **NPSH** da Planilha Automatizada

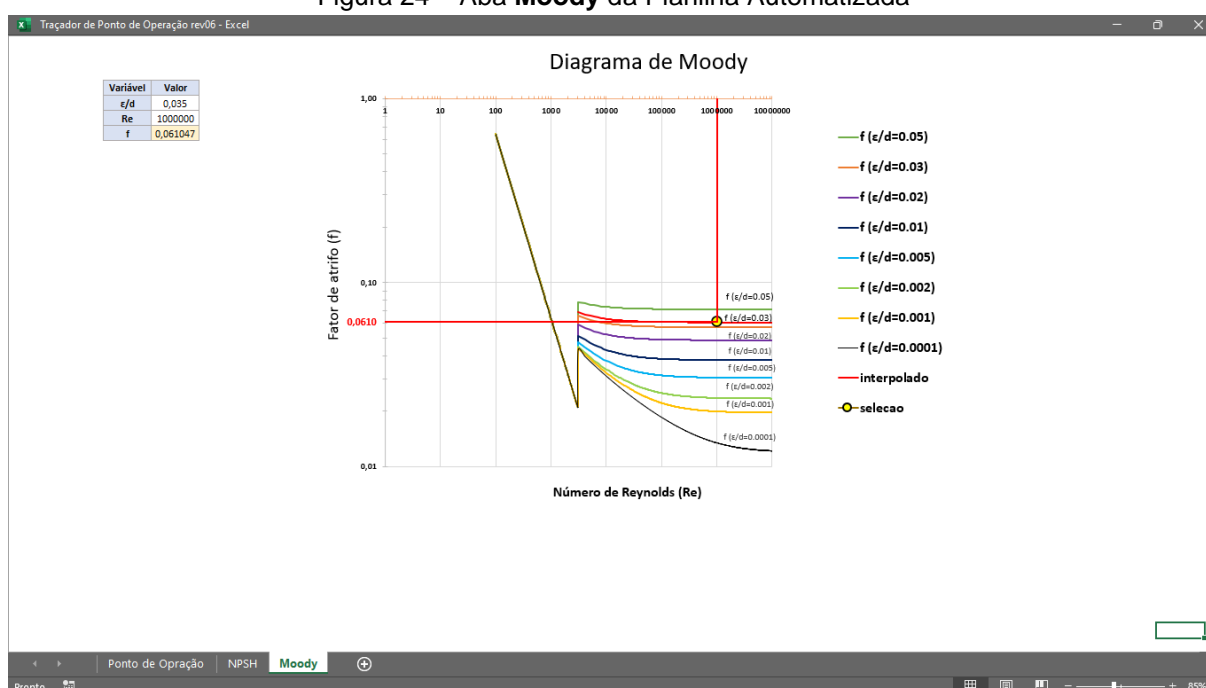


Fonte: Autor

Nesta página o foco é dado para a sucção da bomba, o desnível geométrico descrito nesta página refere-se do nível do líquido até a linha de centro da bomba, já na aba Ponto de Operação, o desnível que deve ser descrito lá é em relação a linha da bomba e o ponto de descarga.

Na página Moody, temos o gráfico de Moody, que foi desenvolvido para validar o código descrito no ANEXO 15 para o cálculo iterativo do coeficiente de atrito, podendo ser utilizado pelo usuário como uma calculadora em separado, basta informar o valor do número de Reynolds e o valor da rugosidade sobre o diâmetro do tubo.

Figura 24 – Aba **Moody** da Planilha Automatizada

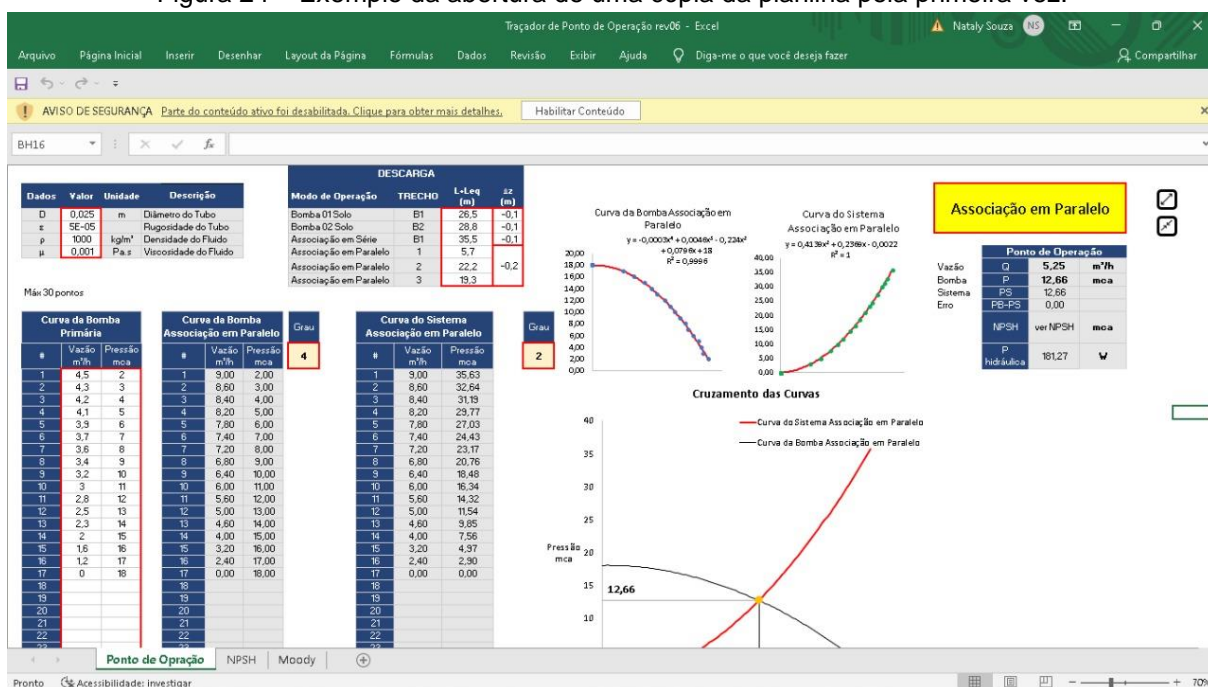


Observação 01: A planilha possui bloqueio por padrão para a proteção das fórmulas.

Observação 02: Não utilizar com outros editores de planilhas, somente funciona no Excel.

Observação 03: A partir da primeira utilização da planilha, é preciso HABILITAR EDIÇÃO ou HABILITAR CONTEÚDO, para que os códigos em VBA funcionem.

Figura 24 – Exemplo da abertura de uma cópia da planilha pela primeira vez.



Fonte: Autor

A planilha está disponível para download através do link do Google Drive:

https://drive.google.com/drive/folders/1FWe3k_8DdgKDIT3KXihHBF1L3edGAakW?usp=sharing

5. CONCLUSÕES

O trabalho trouxe uma abordagem de aplicação direta dos conceitos de fenômenos de transporte e bombeio por meio do modelo matemático descrito que, juntamente com a planilha de cálculos desenvolvida, tornou-se um projeto de maior alcance.

As conclusões deste projeto estão atreladas as aplicações que este material pode vir a ter, sendo utilizado como ferramenta didática, onde o professor e o aluno poderão a partir deste modelo propor soluções e desafios que podem ser abordados em sala de aula, laboratorialmente e computacionalmente.

A planilha desenvolvida pode ser uma ferramenta bastante útil no que diz respeito à elaboração de cálculos de malhas hidráulicas, sendo um ponto de partida para o aprendizado e implementações de soluções por outros engenheiros e alunos.

Uma proposta de evolução para este projeto é a adaptação para um sistema de múltiplas bombas, o que é um método de cálculo utilizado por grandes fabricantes para especificação de sistemas de pressurização da malha hidráulica de grandes edifícios.

6. REFERÊNCIAS

CORTER, J. E.; ESCHE, S. K.; CHASSAPIS, C.; MA, J.; NICHERSON, J. V. Process and learning outcomes from remotely-operated, simulated and hands-on student laboratories. *Computers & Education*, v. 57, p. 2054-2067, 2011.

Reid, R C, Prausnitz, J M, and Poling, B E. *The properties of gases and liquids*. United States: N. p., 1987. Web.

Coban MT (2012) Error analysis of non-iterative friction factor formulas relative to Colebrook-White equation for the calculation of pressure drop in pipes. *Journal of Naval Science and Engineering* 8:1-13.

PREDIAL ÁGUA FRIA CATÁLOGO TÉCNICO - TIGRE. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/tigre/aguafrigia.pdf>> Acesso em 03 nov. 2021.

END SUCTION CLOSE COUPLED MULTISTAGE – GRUNDFOS. Disponível em <<https://product-selection.grundfos.com/products/cm-cme/cm/cm-3-2-97568313?productnumber=97568313&freq=60&lang=PTG&tab=variant-curves>> Acesso em 03 nov. 2021.

TABELA DE SELEÇÃO DE BOMBAS E MOTOBOMBAS – SCHNEIDER – 2021. Disponível em: <https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/302666/schneider_tabela_selecao_2021-10_web.pdf> Acesso em 01 nov. 2021.

PARALLEL OPERATION – KSB – 2021. Disponível em: <[https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/parallel-operation/191648/#:~:text=Parallel%20operation%2C%20or%20parallel%20pumping,one%20of%20the%20two%20pumps.&text=At%20point%204%2C%20one%20other,%20Doff%20head%20\(H0\)](https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/parallel-operation/191648/#:~:text=Parallel%20operation%2C%20or%20parallel%20pumping,one%20of%20the%20two%20pumps.&text=At%20point%204%2C%20one%20other,%20Doff%20head%20(H0))> Acesso 10 Jan 2022.

Engineering ToolBox, (2003). *Cavitation*. [online]. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/cavitation-d_407.html> Acesso em 10 Jan 2022.

Engineering ToolBox, (2003). Atmospheric Pressure vs. Elevation above Sea Level. [online]. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html> Acesso em 10 Jan 2022.

7. ANEXOS

Anexo 01 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Bomba 01 Solo.

Anexo 02 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Bomba 02 Solo.

Anexo 03 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Associação em Série.

Anexo 04 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Associação em Paralelo.

Anexo 05 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Bomba 01 Solo.

Anexo 06 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Bomba 02 Solo.

Anexo 07 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Associação em Série.

Anexo 08 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Associação em Paralelo.

Anexo 09 – Desenho Geral com vista Superior e Medidas do Skid.

Anexo 10 – Desenho Geral com vista Lateral e Medidas do Skid

Anexo 11 – Memorial de Cálculo Modo Bomba 01 Solo.

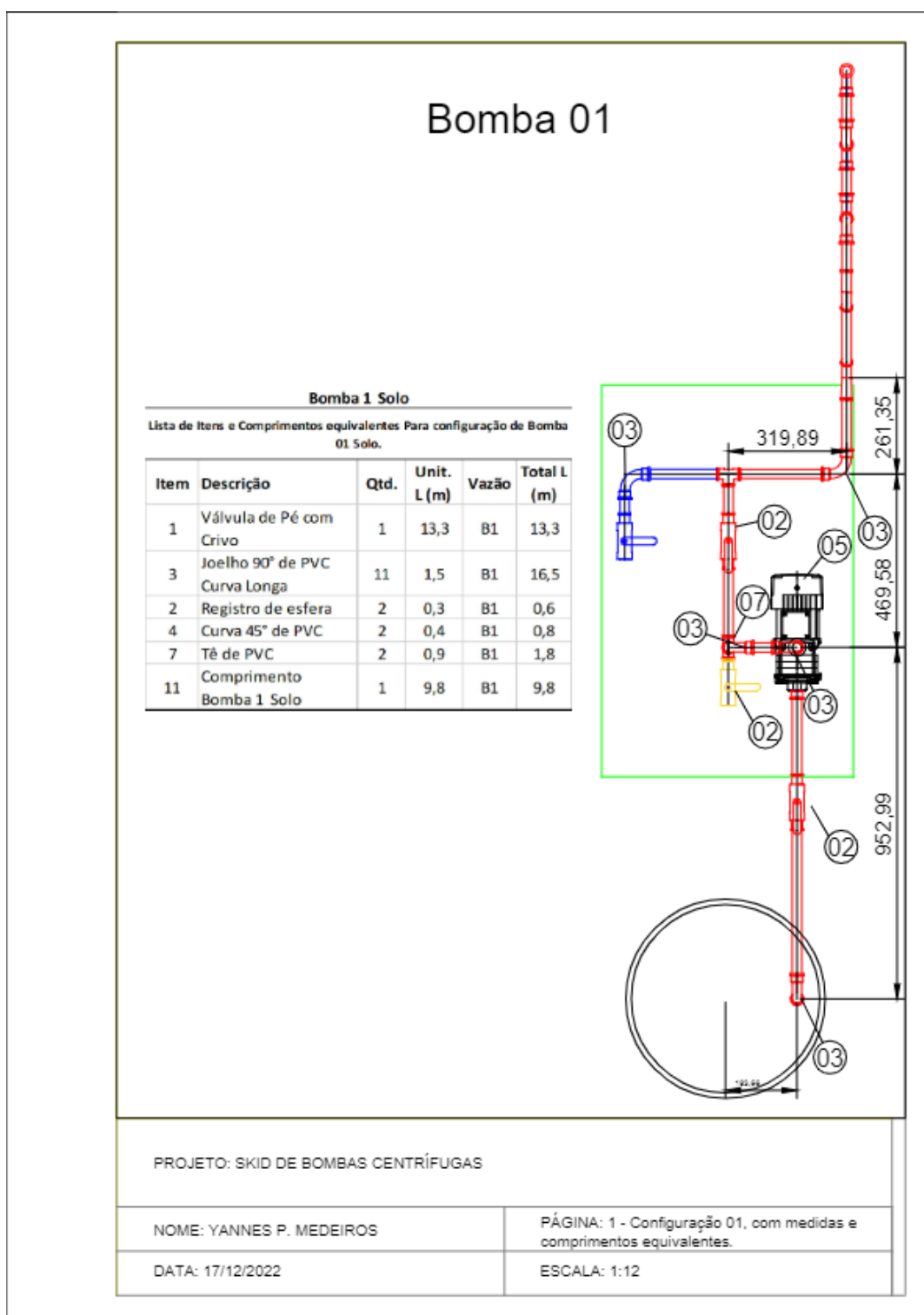
Anexo 12 - Memorial de Cálculo Modo Bomba 02 Solo

Anexo 13 - Memorial de Cálculo Modo Associação em Série

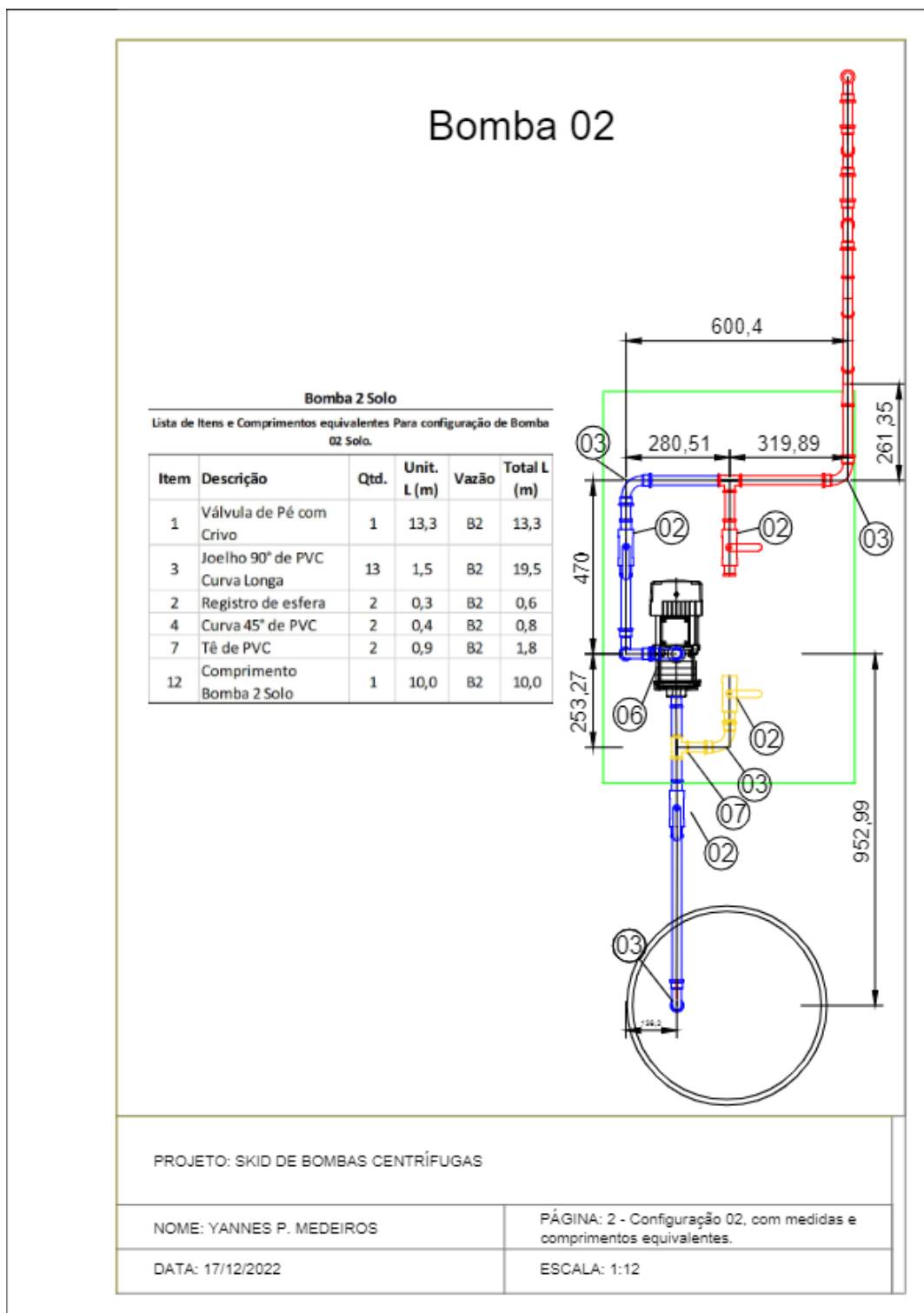
Anexo 14 - Memorial de Cálculo Modo Associação em Paralelo

Anexo 15 – Script em VBA para resolução da Equação de Colebrook.

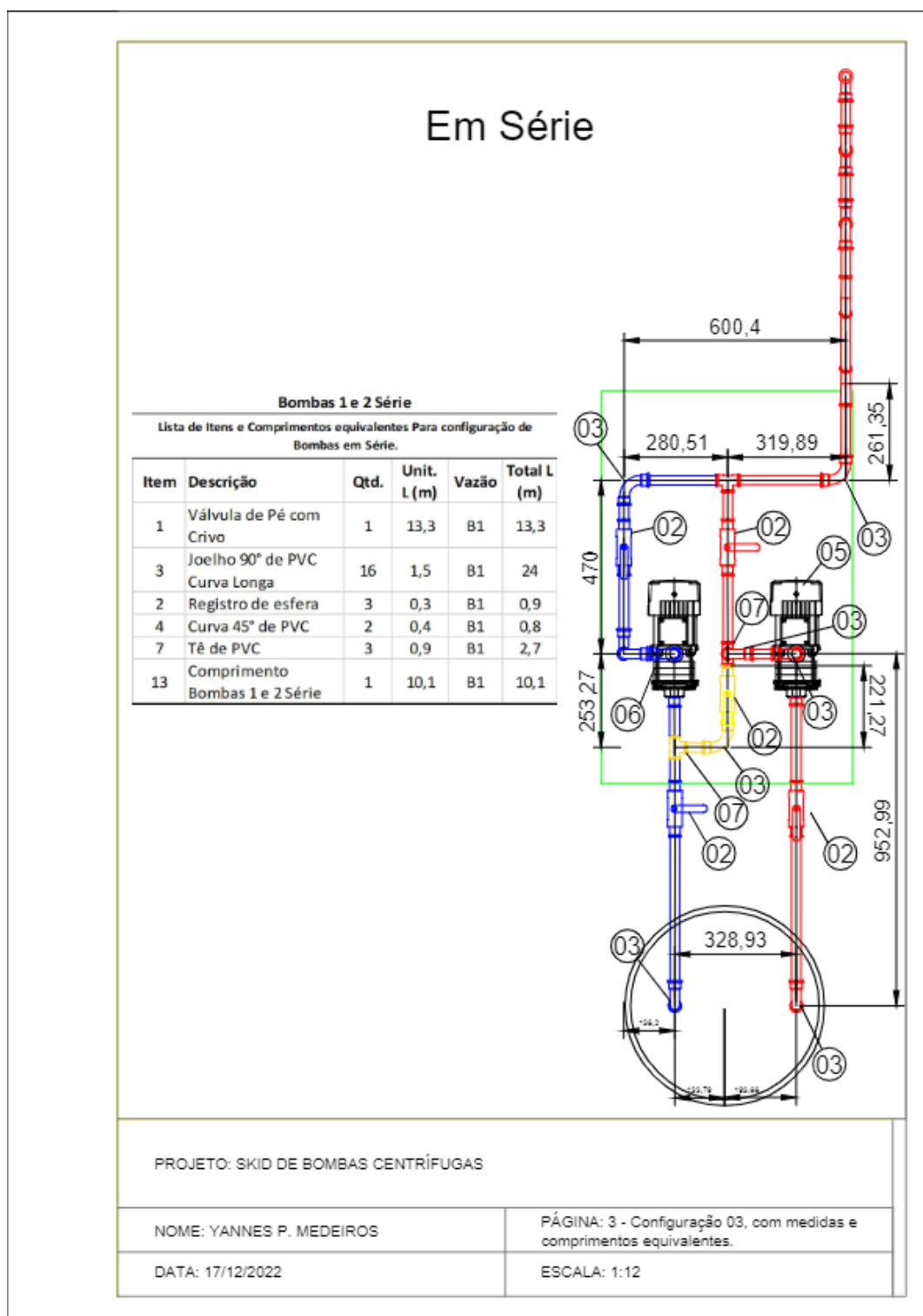
Anexo 01 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Bomba 01 Solo (cotas em mm)



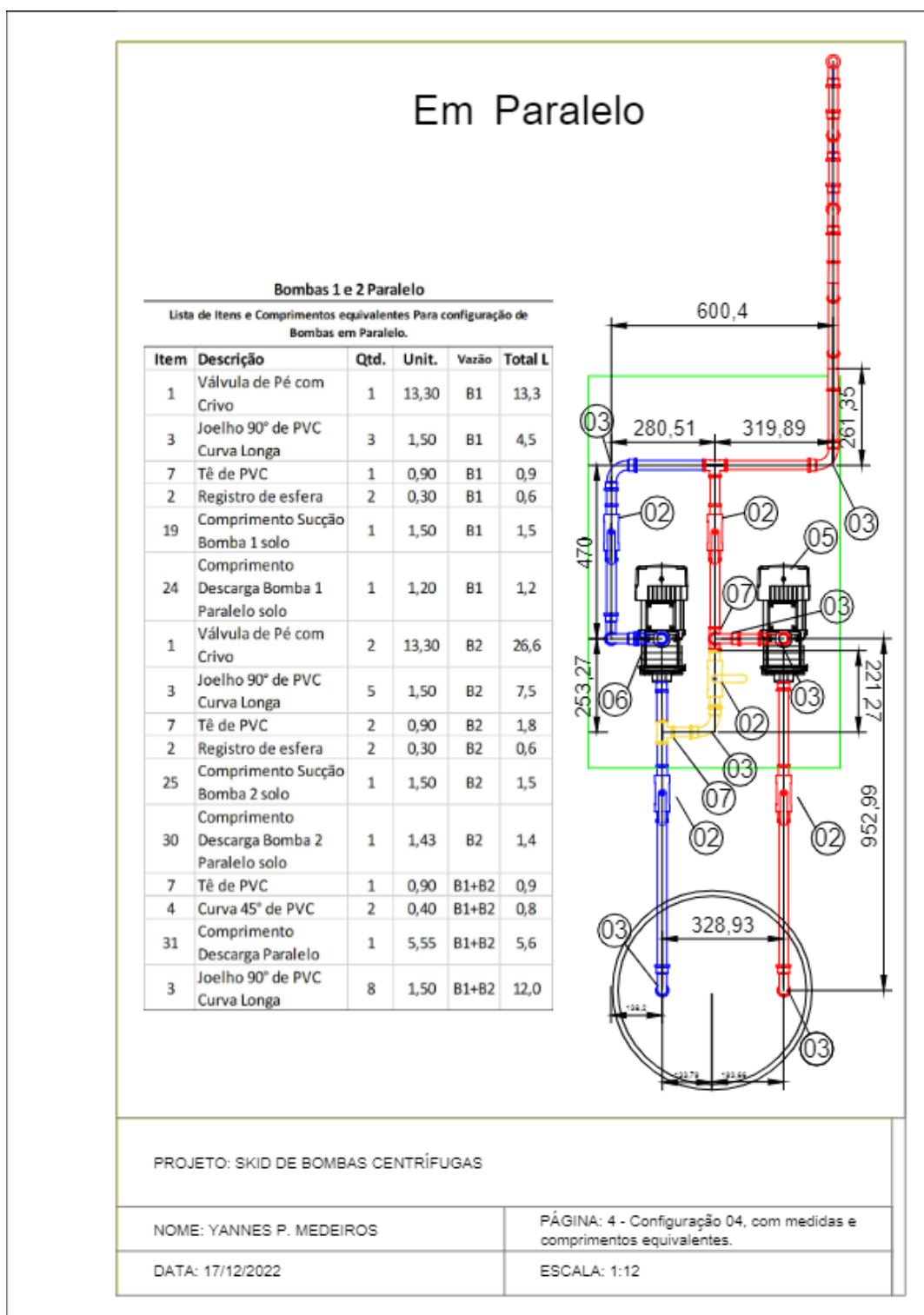
Anexo 02 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Bomba 02 Solo (cotas em mm)



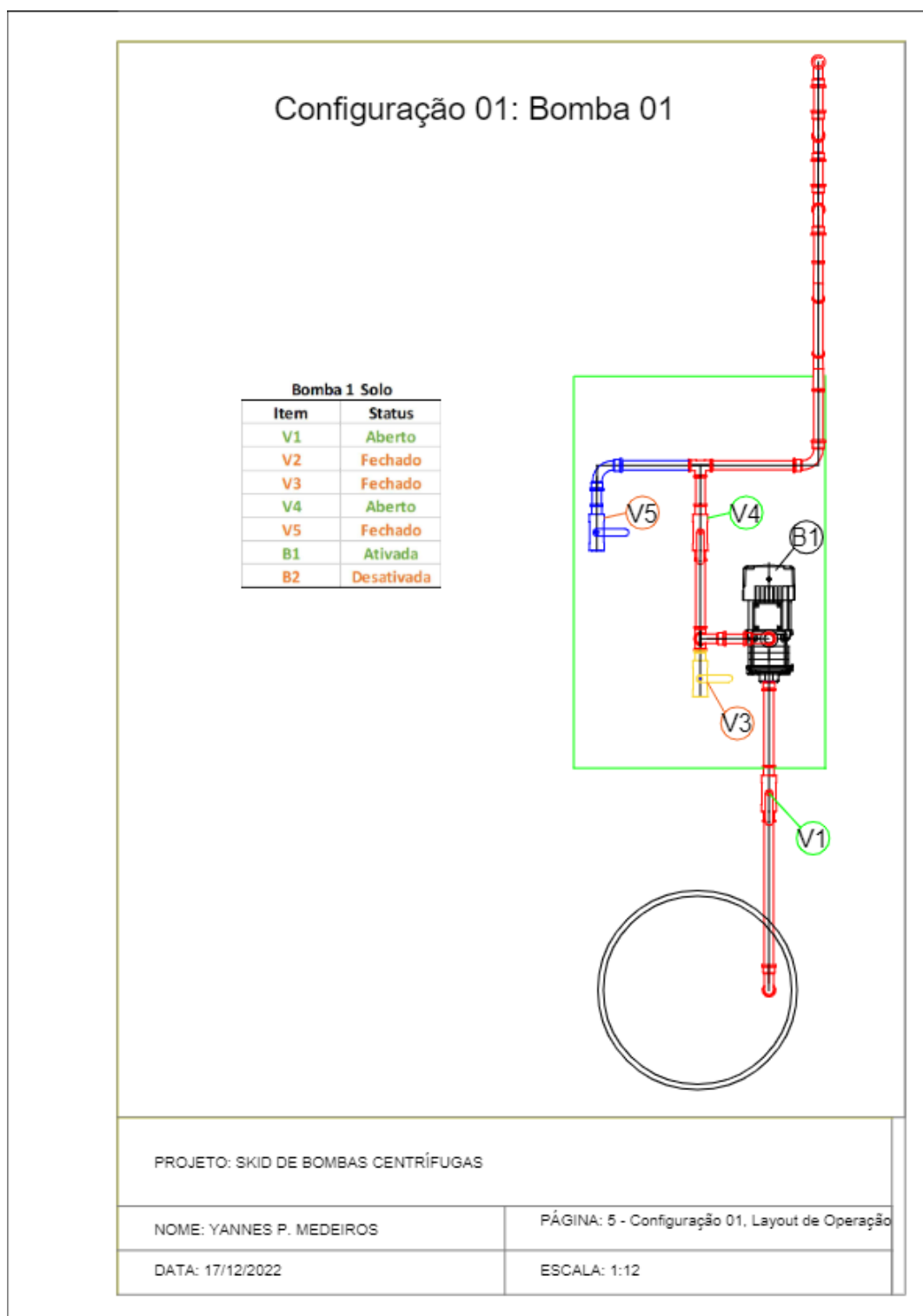
Anexo 03 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Associação em Série (cotas em mm)



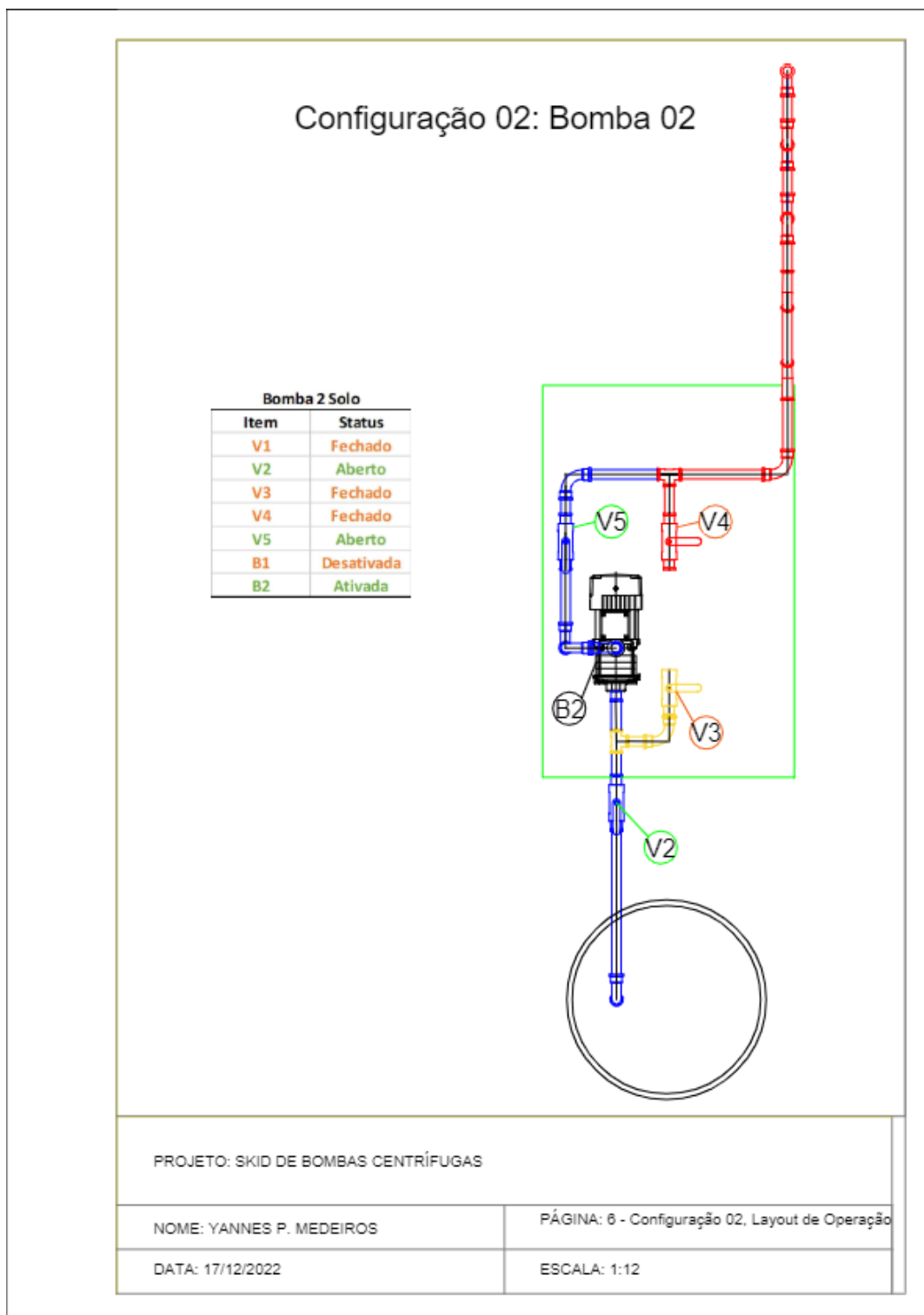
Anexo 04 – Desenho, itens e Tabela de Comprimentos do Modo Associação em Paralelo (cotas em mm)



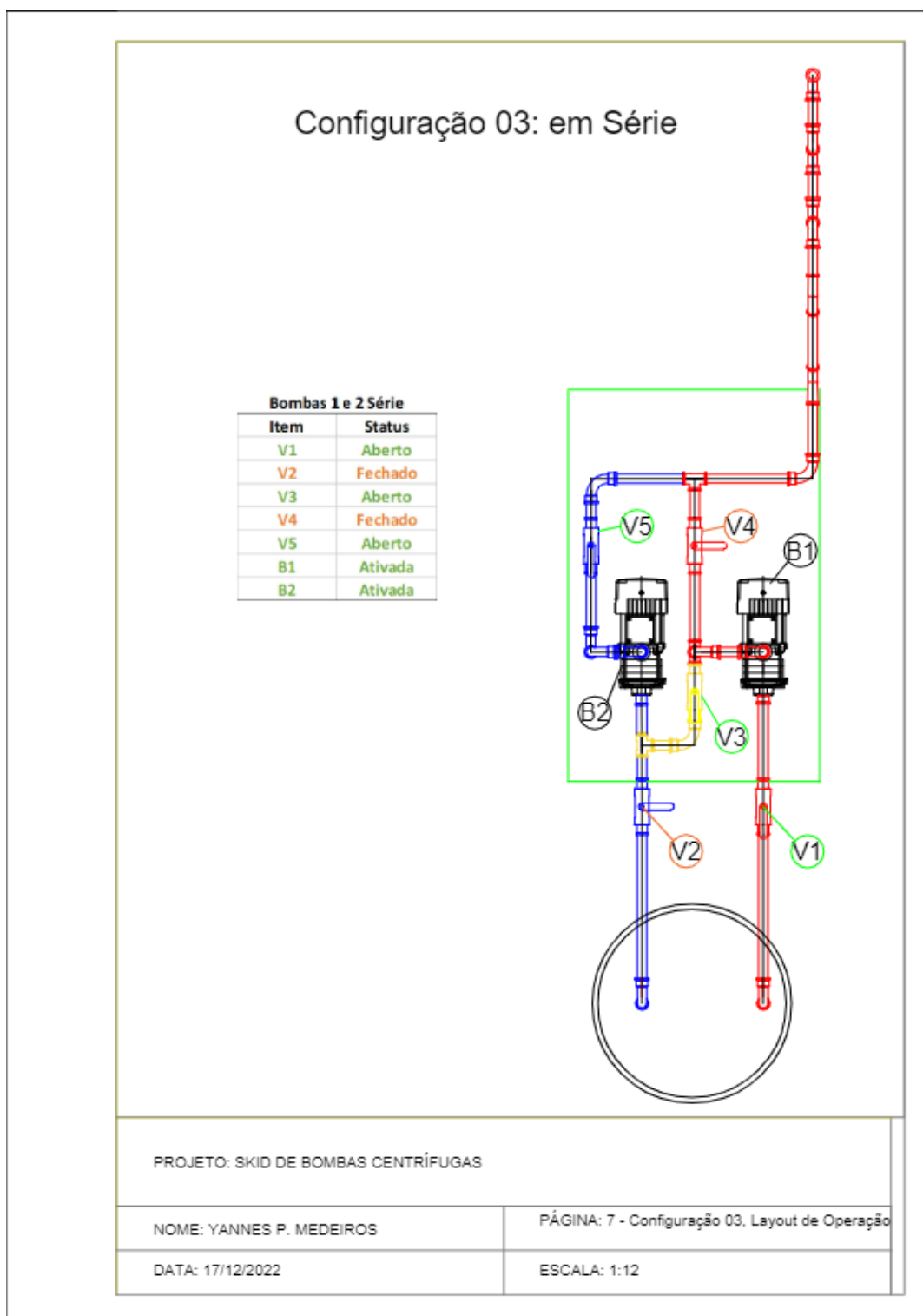
Anexo 05 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Bomba 01 Solo



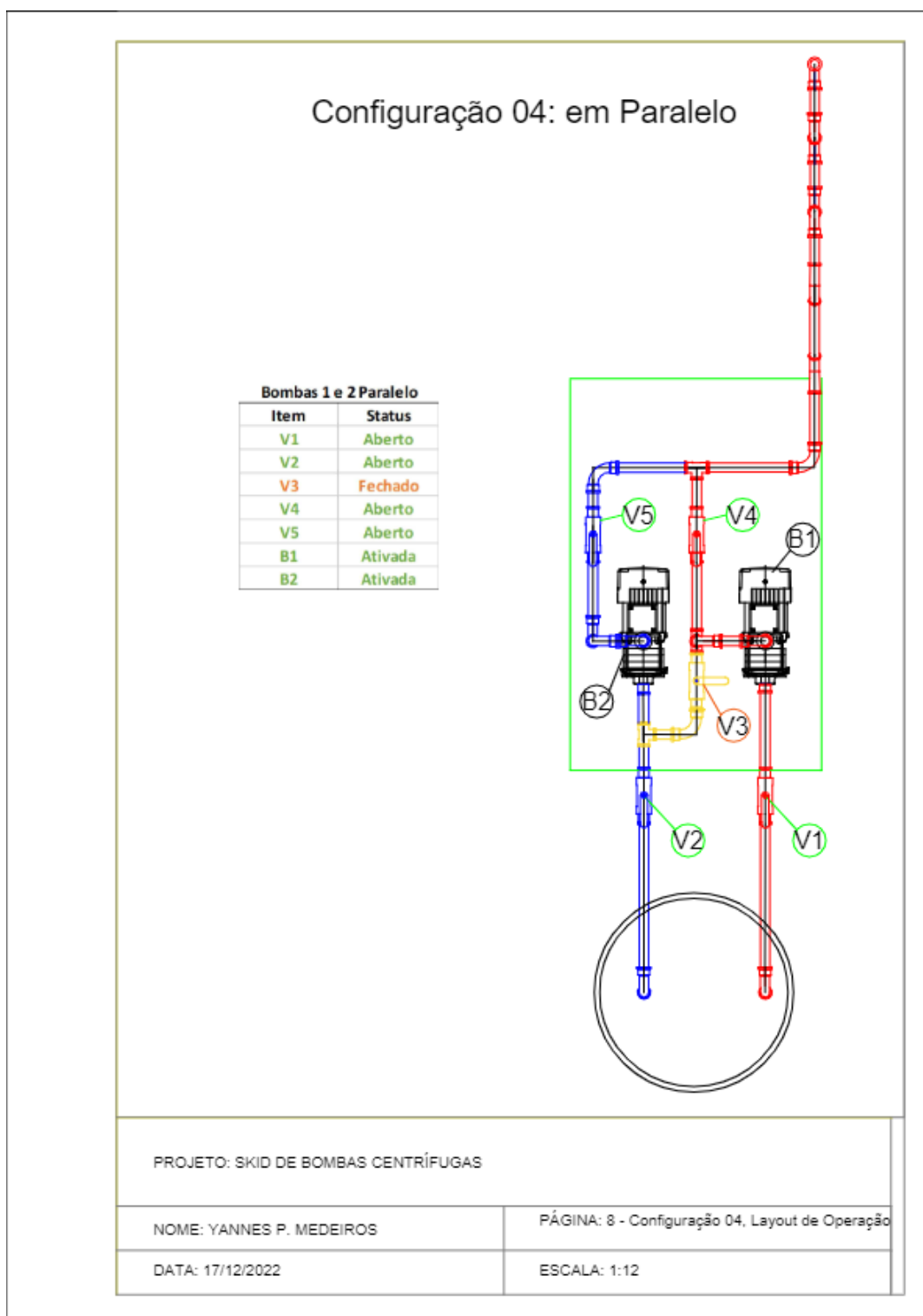
Anexo 06 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Bomba 02 Solo.



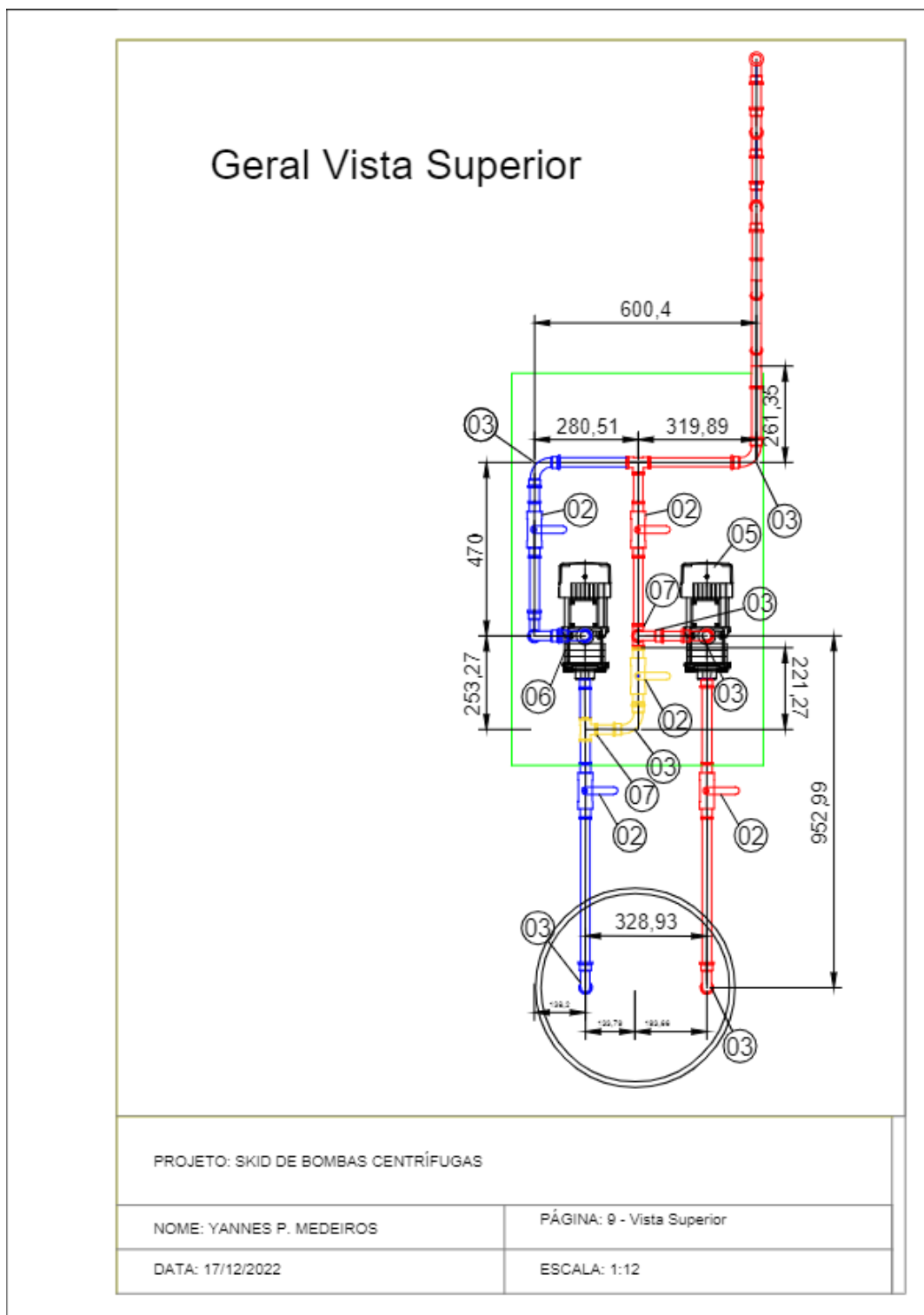
Anexo 07 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Associação em Série.



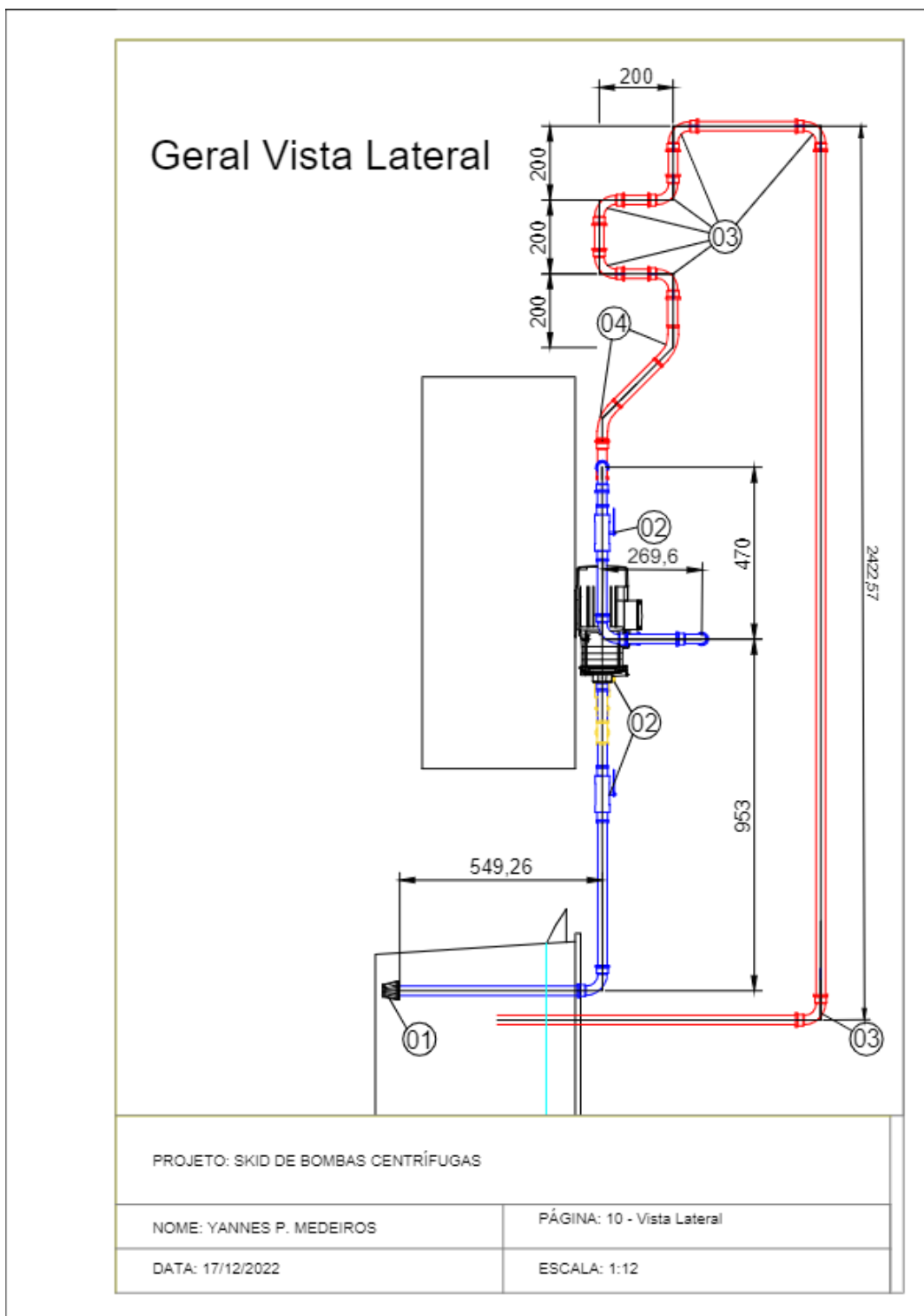
Anexo 08 – Desenho da Configuração das Válvulas para o Modo Associação em Paralelo.



Anexo 09 – Desenho Geral com vista Superior e Medidas do sistema (cotas em mm)



Anexo 10 – Desenho Geral com vista Lateral e Medidas do Sistema (cotas em mm)



Anexo 11 – Memorial de Cálculo Modo Bomba 01 Solo.

Curva do Sistema do Modo Bomba 01 Solo.

V (m/s)	Re	Cf	H (m)
2,55	63661,9772	0,0255163	14,423884
2,43	60832,556	0,02562053	13,2240494
2,38	59417,8454	0,02567586	12,6433744
2,32	58003,1348	0,02573351	12,0755314
2,21	55173,7136	0,02585643	10,9783549
2,09	52344,2924	0,02599069	9,93254805
2,04	50929,5818	0,02606258	9,42891835
1,92	48100,1606	0,02621711	8,46022919
1,81	45270,7394	0,0263879	7,54300186
1,70	42441,3182	0,02657773	6,67728446
1,58	39611,8969	0,0267901	5,86313381
1,41	35367,7651	0,02716089	4,73874709
1,30	32538,3439	0,02745111	4,05373161
1,13	28294,2121	0,02797465	3,12366244
0,91	22635,3697	0,02891022	2,06600228
0,68	16976,5273	0,03031341	1,21853128

Anexo 12 - Memorial de Cálculo Modo Bomba 02 Solo

Curva do Sistema do Modo Bomba 02 Solo.

V (m/s)	Re	Cf	H (m)
2,55	63661,9772	0,0255163	15,51
2,43	60832,556	0,02562053	14,22
2,38	59417,8454	0,02567586	13,60
2,32	58003,1348	0,02573351	12,99
2,21	55173,7136	0,02585643	11,81
2,09	52344,2924	0,02599069	10,68
2,04	50929,5818	0,02606258	10,14
1,92	48100,1606	0,02621711	9,10
1,81	45270,7394	0,0263879	8,11
1,70	42441,3182	0,02657773	7,18
1,58	39611,8969	0,0267901	6,31
1,41	35367,7651	0,02716089	5,10
1,30	32538,3439	0,02745111	4,36
1,13	28294,2121	0,02797465	3,36
0,91	22635,3697	0,02891022	2,22
0,68	16976,5273	0,03031341	1,31

Anexo 13 - Memorial de Cálculo Modo Associação em Série

Cálculo da Curva da Bomba resultante da Associação em Série

Bomba 01		Bomba 02		Série	
(m ³ /h)	(mca)	(m ³ /h)	(mca)	(m ³ /h)	(mca)
4,5	2	4,5	2	4,5	4
4,3	3	4,3	3	4,3	6
4,2	4	4,2	4	4,2	8
4,1	5	4,1	5	4,1	10
3,9	6	3,9	6	3,9	12
3,7	7	3,7	7	3,7	14
3,6	8	3,6	8	3,6	16
3,4	9	3,4	9	3,4	18
3,2	10	3,2	10	3,2	20
3	11	3	11	3	22
2,8	12	2,8	12	2,8	24
2,5	13	2,5	13	2,5	26
2,3	14	2,3	14	2,3	28
2	15	2	15	2	30
1,6	16	1,6	16	1,6	32
1,2	17	1,2	17	1,2	34

Cálculo da Curva do Sistema do Modo de Operação em Série.

V (m/s)	Re	Cf	H (m)
2,55	63661,9772	0,0255163	17,47
2,43	60832,556	0,02562053	16,01
2,38	59417,8454	0,02567586	15,31
2,32	58003,1348	0,02573351	14,62
2,21	55173,7136	0,02585643	13,29
2,09	52344,2924	0,02599069	12,03
2,04	50929,5818	0,02606258	11,42
1,92	48100,1606	0,02621711	10,24
1,81	45270,7394	0,0263879	9,13
1,70	42441,3182	0,02657773	8,09
1,58	39611,8969	0,0267901	7,10
1,41	35367,7651	0,02716089	5,74
1,30	32538,3439	0,02745111	4,91
1,13	28294,2121	0,02797465	3,78
0,91	22635,3697	0,02891022	2,50
0,68	16976,5273	0,03031341	1,48

Anexo 14 - Memorial de Cálculo Modo Associação em Paralelo

Cálculo da Curva da Bomba resultante da Associação em Paralelo

Bomba 01		Bomba 02		Paralelo	
(m ³ /h)	(mca)	(m ³ /h)	(mca)	(m ³ /h)	(mca)
4,5	2	4,5	2	9,0	2,0
4,3	3	4,3	3	8,6	3,0
4,2	4	4,2	4	8,4	4,0
4,1	5	4,1	5	8,2	5,0
3,9	6	3,9	6	7,8	6,0
3,7	7	3,7	7	7,4	7,0
3,6	8	3,6	8	7,2	8,0
3,4	9	3,4	9	6,8	9,0
3,2	10	3,2	10	6,4	10,0
3	11	3	11	6,0	11,0
2,8	12	2,8	12	5,6	12,0
2,5	13	2,5	13	5,0	13,0
2,3	14	2,3	14	4,6	14,0
2	15	2	15	4,0	15,0
1,6	16	1,6	16	3,2	16,0
1,2	17	1,2	17	2,4	17,0

Cálculo da Curva do Sistema Associação em Paralelo.

V1 (m/s)	V2 (m/s)	V1+V2	Re1	Re2	Re1+2
2,55	2,54647909	5,09295818	63661,9772	63661,98	127323,954
2,43	2,43330224	4,86660448	60832,556	60832,56	121665,112
2,38	2,37671382	4,75342763	59417,8454	59417,85	118835,691
2,32	2,32012539	4,64025079	58003,1348	58003,13	116006,27
2,21	2,20694854	4,41389709	55173,7136	55173,71	110347,427
2,09	2,0937717	4,18754339	52344,2924	52344,29	104688,585
2,04	2,03718327	4,07436654	50929,5818	50929,58	101859,164
1,92	1,92400642	3,84801285	48100,1606	48100,16	96200,3212
1,81	1,81082957	3,62165915	45270,7394	45270,74	90541,4787
1,70	1,69765273	3,39530545	42441,3182	42441,32	84882,6363
1,58	1,58447588	3,16895176	39611,8969	39611,90	79223,7939
1,41	1,41471061	2,82942121	35367,7651	35367,77	70735,5303
1,30	1,30153376	2,60306751	32538,3439	32538,34	65076,6878
1,13	1,13176848	2,26353697	28294,2121	28294,21	56588,4242
0,91	0,90541479	1,81082957	22635,3697	22635,37	45270,7394
0,68	0,67906109	1,35812218	16976,5273	16976,53	33953,0545

Cálculo da Curva do Sistema Associação em Paralelo (continuação)

Cf1	Cf2	Cf1+2	H 1(m)	H 2(m)	H 3(m)	H(m)
0,0255163	0,0255163	0,02431	7,42305519	13,3011012	24,7441566	45,47
0,02562053	0,02562053	0,02437	6,80557666	12,194664	22,6497597	41,65
0,02567586	0,02567586	0,02440	6,50674017	11,6591898	21,6370905	39,80
0,02573351	0,02573351	0,02443	6,21450755	11,1355489	20,6474425	38,00
0,02585643	0,02585643	0,02450	5,64986059	10,1237786	18,737216	34,51
0,02599069	0,02599069	0,02458	5,11165038	9,15937943	16,9190926	31,19
0,02606258	0,02606258	0,02463	4,85246422	8,69495323	16,0445741	29,59
0,02621711	0,02621711	0,02472	4,35394156	7,8016687	14,3646343	26,52
0,0263879	0,0263879	0,02482	3,88190303	6,95584011	12,7768404	23,61
0,02657773	0,02657773	0,02493	3,43637338	6,15751181	11,2812156	20,88
0,0267901	0,0267901	0,02506	3,01738185	5,40673621	9,87778822	18,30
0,02716089	0,02716089	0,02529	2,43873156	4,36987392	7,94559536	14,75
0,02745111	0,02745111	0,02547	2,08619768	3,73818136	6,77283222	12,60
0,02797465	0,02797465	0,02579	1,60755027	2,88051055	5,18688934	9,67
0,02891022	0,02891022	0,02639	1,06323989	1,90518069	3,39608829	6,36
0,03031341	0,03031341	0,02730	0,62710051	1,12367847	1,97642879	3,73

Anexo 15 - Script em VBA para resolução da Equação de Colebrook.

```
Function FactorAtrit(Re, ksd)

Dim f, f0, f1, precisao, contador As Double

precisao = 0.00001
contador = 100000
f = 0.00001

If (ksd = "" Or Re = "") Then
    End
End If

While (contador >= precisao)

    f0 = f
    f = (1 / (-2 * Log(ksd / 3.7 + 2.51 / (Re * (f ^ 0.5)))) / Log(10#)) ^ 2
    f1 = f

    contador = f0 - f1

    If contador < 0 Then
        contador = contador * -1
    End If

    If (contador <= precisao) Then
        FactorAtrit = f
    End If

Wend

End Function
```