

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LAÉRCIO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM LABORATÓRIO**

BENTO GONÇALVES

2020

LAÉRCIO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM LABORATÓRIO**

Relatório de Estágio II MEC0291XH,
apresentado à Universidade de Caxias do Sul,
como requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico no curso de Engenharia
Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Evandro Paese

BENTO GONÇALVES

2020

LAÉRCIO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM LABORATÓRIO**

Relatório de Estágio II MEC0291XH,
apresentado à Universidade de Caxias do Sul
como requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico no Curso de Engenharia
Mecânica.

Aprovado em: 10 / 12 / 2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Evandro Paese
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Tiago Cassol Severo
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. André Carlos Contini
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho a minha mãe, Neci Fátima Schlick dos Santos, meu pai, Valmor dos Santos, minha irmã, em especial à minha namorada, Monica Zardo Gottardo e a todos os amigos que sempre estiveram me incentivando e apoiando nos momentos difíceis, e para todos os meus colegas e professores da graduação. E, especialmente a Deus.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos:

A Deus, por me dar a graça de realizar este sonho.

Aos meus pais, Neci Fátima Schlick dos Santos e Valmor dos Santos que sempre me apoiaram e incentivaram.

À minha irmã, Angela Maria dos Santos pelo apoio.

À minha namorada, Monica Zardo Gottardo, pela paciência e compreensão.

Ao professor Dr. Evandro Paese, pela orientação.

RESUMO

Visando o estudo de alguns aspectos do comportamento de bombas centrífugas, o presente trabalho trata do desenvolvimento de uma bancada para se obter através de ensaios em laboratório, a curva Pressão *versus* Vazão destes equipamentos. A justificativa deste trabalho visa proporcionar o projeto de um equipamento capaz de suprir a necessidade por uma gama maior de ensaios dentro do Laboratório de Fluidos da UCS – Campus Bento Gonçalves. Após a realização de uma revisão bibliográfica aonde foi mostrada a teoria sobre tipos de bombas e seus funcionamentos, foi desenvolvido um projeto para execução de uma bancada para realizar o desenvolvimento das curvas características para bombas centrífugas. Após a fase de projeto, foi realizada a montagem do referido equipamento, através da utilização de componentes já existentes no laboratório da UCS e outros componentes que se necessitou realizar a aquisição. Na fase dos ensaios experimentais para a obtenção dos resultados propostos, inicialmente foram realizados testes de pressão e vazão de forma analógica, a fim de definir as curvas e equações dos transdutores, assim podendo definir para cada ponto de tensão medida em volts, uma vazão medida em litros por minuto e uma pressão medida em metros de coluna de água. Na realização dos experimentos para a obtenção das curvas propostas, foi aplicado o método de variação de pressão e vazão através do fechamento gradativo de válvulas de gaveta montadas logo após o bocal de recalque das bombas. Com a coleta dos dados de pressão e vazão gerados pelo fluxo de água através da tubulação, identificados pelos transdutores e lidos pela placa de aquisição de dados, foi gerado no *Matlab* uma lista de valores para cada medição, as quais consistiram em 10 leituras por segundo, durante 10 segundos, gerando assim 100 valores, dos quais foi feita uma média para assim gerar o gráfico com as curvas características das bombas. Através dos dados coletados no experimento, foi realizado um comparativo entre estes dados e os dados do catálogo da Ferramentas Gamma, fornecedora das bombas utilizadas neste trabalho, assim percebendo-se uma semelhança considerável entre eles, sendo na pressão máxima uma diferença de 10% maior do valor do experimento em relação ao catálogo e para a vazão, um valor de 9,4% maior da vazão máxima do experimento em relação ao catálogo, validando assim o projeto proposto e desenvolvido no presente trabalho.

Palavras-chave: Bancada, Bomba Centrífuga, pressão, vazão, laboratório, ensaio.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Bomba Alternativa de Pistão	15
Figura 2: Bomba Alternativa de Êmbolo.....	15
Figura 3: Bomba Alternativa de Diafragma	16
Figura 4: Bomba Rotativa de Engrenagens	17
Figura 5: Bomba Rotativa de Palhetas	17
Figura 6: Bomba Rotativa de Pistão Axial	18
Figura 7: Bomba Rotativa de Pistão Radial.....	18
Figura 8: Bomba Rotativa Lobular	19
Figura 9: Rotor de Turbobomba aberto e fechado.....	19
Figura 10: Bomba Centrífuga em caixa em voluta.....	20
Figura 11: Bomba Axial	21
Figura 12: Bomba Centrífuga Diagonal	21
Figura 13: Bomba Centrífuga Helicoidal	22
Figura 14: Bomba Centrífuga Radial	22
Figura 15: Rotor danificado por cavitação	24
Figura 16: Esquemático da canalização de sucção e do rotor de uma.....	26
Figura 17: Tipos de curvas características de bombas centrífugas	28
Figura 18: Esquema simplificado para determinação de curvas característica	29
Figura 19: Montagem associação com duas bombas em série	31
Figura 20: Montagem associação com duas bombas em paralelo.....	32
Figura 21: Bomba Gamma QB60.....	33
Figura 22: Transdutor de vazão Simokit	34
Figura 23: Transdutor de Pressão MC1	34
Figura 24: Placa de Aquisição de Dados USB-201 MC.....	35
Figura 25: Tanque de água	36
Figura 26: Tubo quadrado 30 x 30 mm	36
Figura 27: Quadro de comando e força para acionamento das bombas	37
Figura 28: Bancada de teste de Bombas	39
Figura 29: Curva Transdutor de Pressão	41
Figura 30: Curva Transdutor de Vazão	42
Figura 31: Curva Pressão <i>versus</i> Vazão bomba operando individual	43
Figura 32: Curva Pressão <i>versus</i> Vazão bombas operando em série	45

Figura 33: Curva Pressão <i>versus</i> Vazão bombas operando em paralelo	46
Figura 34: Curva do catálogo Ferramentas Gamma bomba QB60	48
Figura 35: Comparativo entre curva do catálogo e curva do experimento.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de pressão e tensão dos Transdutores de Pressão.....	40
Tabela 2: Valores de vazão e tensão dos Transdutores de Vazão	41
Tabela 3: Dados bomba operando individualmente	43
Tabela 4: Dados bombas operando em série	44
Tabela 5: Dados bombas operando em paralelo.....	46
Tabela 6: Dados bomba QB60 catálogo Ferramentas Gamma	47

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Velocidade do líquido [m/s]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
h	Altura manométrica [mca]
H	Altura de elevação [m]
H_{sg}	Altura de sucção geométrica [mca]
H_{ps}	Perda de carga na tubulação de sucção [mca]
η_{qA}	Velocidade de rotação específica [-]
P	Pressão de vaporização do líquido na temperatura de bombeamento [kgf/m^2]
P	Pressão da bomba [mca]
Q	Vazão da bomba [l/min]
V	Tensão dos Transdutores [V]
W_3	Velocidade relativa [m/s]
Y	Salto energético [J/kg]
Δp_s	Depressão suplementar [kgf/m^2]
γ	Peso específico do líquido bombeado [kgf/m^3]
λ	Valor empírico estimado para calcular o $NPSH_b$ [-]
σ	Coefficiente de cavitação [-]
ρ	Massa específica [kg/m^3]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
1.2	TEMA	12
1.3	JUSTIFICATIVA DO TEMA	12
1.4	OBJETIVO GERAL	13
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO	14
2.1.1	Bombas Alternativas: de êmbolo, pistão e diafragma	14
2.1.2	Bombas Rotativas: de engrenagens, palhetas, pistões radiais, pistões axiais e rotores lobulares	16
2.2	TURBOBOMBAS	19
2.2.1	Bomba Axial	20
2.2.2	Bomba Centrífuga Diagonal	21
2.2.3	Bomba Centrífuga Helicoidal	21
2.2.4	Bomba Centrífuga Radial	22
2.3	CAVITAÇÃO	23
2.4	NPSH – <i>NET POSITIVE SUCTION HEAD</i>	25
2.5	CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBAS	27
2.6	ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	30
2.6.1	Associação em série	30
2.6.2	Associação em paralelo	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTOS E MATERIAIS DE MONTAGEM	33
3.1.1	Bomba	33
3.1.2	Transdutores	34
3.1.3	Placa de Aquisição de Dados	35
3.1.4	Tanque, tubos e acessórios	35
3.1.5	Perfil metálico base bombas e base tanque	36
3.1.6	Painel elétrico de comando e força	37
3.2	MÉTODOS DE ENSAIO	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

4.1 CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO E VAZÃO	39
4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA OPERANDO INDIVIDUALMENTE	42
4.3 CURVA CARACTERÍSTICA DAS BOMBAS OPERANDO EM SÉRIE.....	44
4.4 CURVA CARACTERÍSTICA DAS BOMBAS OPERANDO EM PARALELO	45
4.5 COMPARATIVO ENTRE CURVA DO CATÁLOGO GAMMA E CURVA BANCADA UCS PARA BOMBA QB60	47
5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE A – LAYOUT E ITENS BANCADA DE TESTE DE BOMBAS	52
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA BANCADA DE CURVAS DE BOMBAS.....	53
APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO DE COMANDO E FORÇA	54
APÊNDICE D – INSTRUÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DA BANCADA.....	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em inúmeras aplicações nas indústrias de diversos segmentos, são encontrados processos em que se aplica o deslocamento de fluidos por escoamento. Estes deslocamentos, em sua maioria, são realizados por equipamentos denominados Bombas, as quais se apresentam em três tipos: Turbobombas, Bombas de deslocamento positivo ou volumétricas e Bombas Especiais.

Segundo Procel (2009), “Bomba é uma máquina operatriz hidráulica que transfere energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro”. Esta recebe energia de uma fonte motora e cede uma parte dessa energia ao fluido em forma de energia cinética, energia de pressão ou ambas, assim, aumentando a pressão e velocidade do fluido.

1.2 TEMA

Análise de uma bancada laboratorial para obtenção de dados de Pressão *versus* Vazão de bombas centrífugas, podendo-se variar a sua forma de operação individual ou com duas bombas, sendo estas, em série ou paralelo.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A utilização de Bombas para a movimentação de fluidos é muito utilizada em diversos setores das indústrias ao redor do mundo. A Universidade de Caxias do Sul - UCS, Campus de Bento Gonçalves tem em seus cursos, como Engenharia Mecânica e Engenharia Civil, algumas disciplinas, as quais abordam estudos sobre mecânica dos fluidos, especificamente sistemas de bombeamento. Estes sistemas de bombeamento, apresentam a necessidade de estudar os fenômenos que ocorrem durante sua execução, sendo um deles a questão da análise da curva Pressão *versus* Vazão e a operação com a combinação das bombas montada em série ou paralelo, bem como sua operação individual.

Atualmente no Laboratório de Fluidos da UCS - Campus Bento Gonçalves dispõe de uma bancada para obtenção de perdas de carga em tubulações, sendo que esta não possui a estrutura para ser utilizada na obtenção de curvas de bombas.

Assim, visando melhorar a estrutura para o desenvolvimentos das disciplinas que necessita-se ao estudo e obtenção prática das curvas das bombas, propõe-se a execução deste

trabalho para posterior execução da proposta da bancada a ser instalada no Laboratório de Fluidos da UCS - Campus Bento Gonçalves.

1.4 OBJETIVO GERAL

O trabalho proposto tem por objetivo geral desenvolver uma Bancada de medição de Pressão *versus* Vazão de bombas centrífugas, para ser instalada no Laboratório de Fluidos da Universidade de Caxias do Sul, Campus Bento Gonçalves.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, serão traçados os seguintes objetivos específicos:

- Definir as grandezas a serem medidas pela bancada;
- Revisar bibliografia da mecânica dos fluidos aplicado a bombas;
- Projetar e implementar uma bancada que possa medir parâmetros definidos;
- Gerar e analisar curvas características de Pressão *versus* Vazão de Bombas Centrífugas, analisando nas configurações individual, duas bombas em série e duas bombas em paralelo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Drummond (2006), as bombas são definidas como máquinas que são “destinadas à transferência de líquidos de um ponto para outro. Para realizar essa movimentação, as bombas cedem energia ao líquido sob a forma de pressão e de velocidade, sendo a forma de pressão a predominante”.

Segundo Macintyre (1997), as bombas são máquinas geratrizes, tendo estas a finalidade de realizar o deslocamento de um líquido por escoamento, sendo assim, transformando o trabalho mecânico recebido para seu funcionamento em energia, esta sendo comunicado ao fluido, como energia de pressão e cinética. O autor também classifica as bombas em três tipos, sendo: Bombas de deslocamento positivo ou volumógenas, Turbobombas e Bombas especiais (bomba com ejetor; pulsômetros; bomba de emulsão de ar).

2.1 BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Estas bombas são utilizadas normalmente em circuitos hidráulicos que possuem a finalidade de acionar atuadores lineares ou rotativos (cilindros ou motores hidráulicos) para realizar a movimentação de cargas (SANTOS, 2007).

De acordo com Drummond (2006), o nome dado para estas bombas, de deslocamento positivo ou volumétrica, é decorrente do seu modo de trabalho. O autor descreve o funcionamento destas bombas citando que elas “trabalham aprisionando um volume de líquido numa câmara de sucção, deslocam esse volume até a descarga e, nessa região, reduzem o volume da câmara, empurrando o líquido para fora da bomba”.

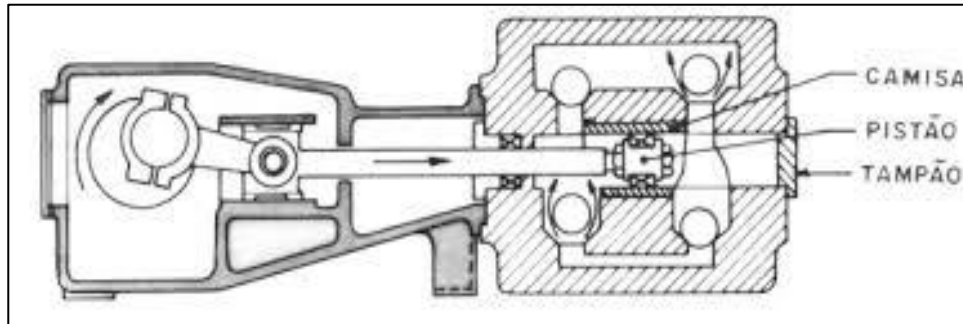
As bombas de deslocamento positivo dividem-se em dois tipos: rotativas e alternativas. As bombas alternativas podem ser encontradas em três tipos, a de pistão, êmbolo e diafragma, já as bombas rotativas são encontradas em cinco tipos, a de engrenagens, palhetas, pistões radiais, pistões axiais e rotores lobulares (SANTOS, 2007).

2.1.1 Bombas Alternativas: de êmbolo, pistão e diafragma

Conforme Procel (2009), as bombas alternativas possuem esta denominação devido à forma de funcionamento de seu pistão dentro do cilindro, o qual faz um movimento alternativo, ou seja, o de vai-e-vem. O texto explica que “A vazão do líquido é consequência da relação existente entre o volume de líquido movimentado pelo pistão no cilindro e o número de golpes do pistão por unidade de tempo”. Para o autor, as bombas alternativas são classificadas em três tipos, as de pistão, êmbolo e de diafragma.

Segundo a classificação de Procel, na bomba alternativa de pistão o dispositivo que produz o movimento do líquido é um pistão que realiza movimentos alternativos dentro do cilindro.

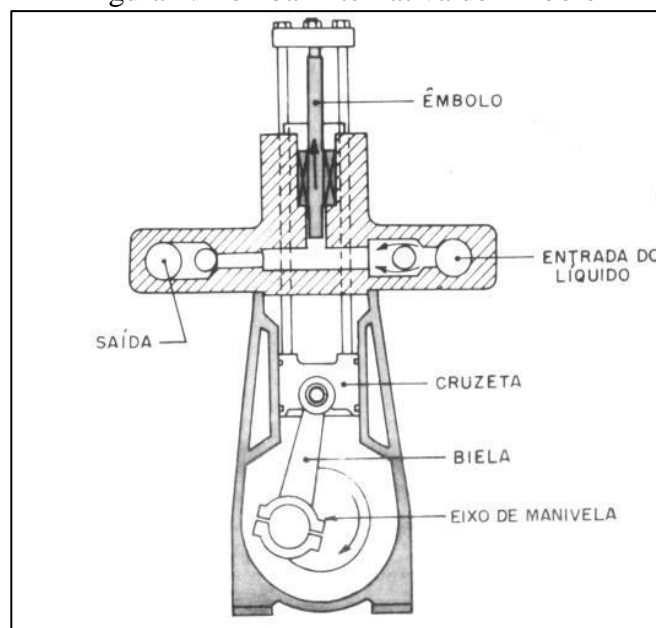
Figura 1: Bomba Alternativa de Pistão



Fonte: Adaptado de Procel (2009)

Nas bombas alternativas de êmbolo, o autor fala que o funcionamento é idêntico ao da bomba alternativa de pistão, sendo o aspecto geométrico do pistão o que as diferencia. O texto cita algumas características destas bombas, como: baixa vazão e alta pressão, vazão por impulso, vazão média independente das características do sistema, rotação variável em função da viscosidade e necessidade de válvula de alívio na linha de descarga, que deve estar junto à bomba e antes de qualquer outra válvula.

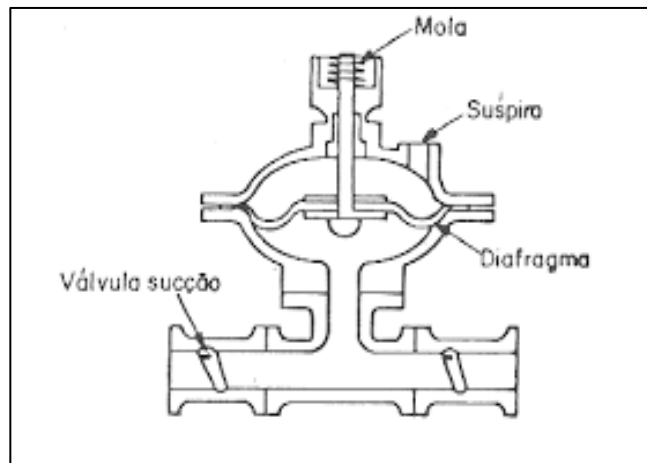
Figura 2: Bomba Alternativa de Êmbolo



Fonte: Adaptado de Procel (2009)

Por fim, o texto fala que as bombas alternativas de diafragma possuem um dispositivo mecânico de impulsão responsável pelo movimento do líquido, o qual é chamado de diafragma, esta sendo uma membrana acionada por movimentos alternativos realizados por uma haste.

Figura 3: Bomba Alternativa de Diafragma



Fonte: Adaptado de Procel (2009)

2.1.2 Bombas Rotativas: de engrenagens, palhetas, pistões radiais, pistões axiais e rotores lobulares

Segundo Macintyre (1997), “Nas bombas rotativas, o líquido recebe a ação de forças provenientes de uma ou mais peças dotadas de movimento de rotação que, comunicando energia de pressão, provocam seu escoamento”.

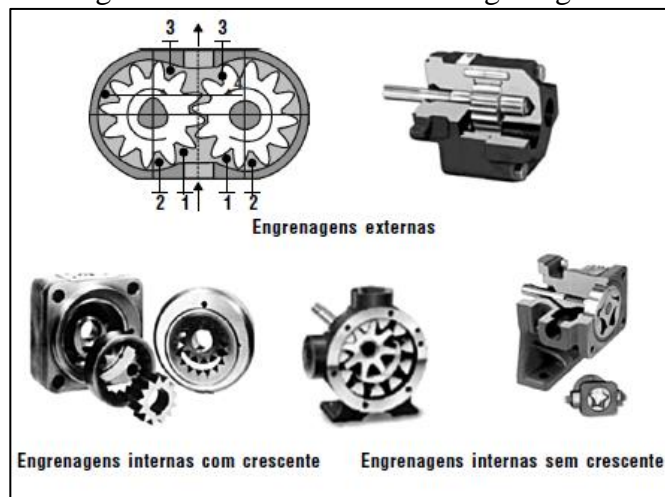
As bombas de engrenagens são encontradas de dois tipos, as de engrenagens internas e externas, sendo as de engrenagens internas serem com crescente e sem crescente (DRUMMOND, 2006).

Através da observação da imagem da Figura 4, Drummond explica brevemente o funcionamento das bombas de engrenagens externas: o líquido existente na região 1, neste caso na entrada da bomba, é aprisionado pelas engrenagens em movimento de giro, sendo levado para a região 2. O volume de líquido bloqueado é transportado pelo giro das engrenagens até a região 3, local aonde é liberado independente da pressão na descarga. O giro das engrenagens segue e chega até a região 4, local aonde os dentes se engrenam e impedem que o líquido retorne para a sucção.

O texto aborda sobre as bombas de engrenagens internas com crescente e explica que as duas engrenagens aprisionam o líquido entre seus dentes e o crescente. Antes do crescente

fica a região de sucção e depois dele se localiza a região de descarga da bomba. Quando o líquido chega à parte superior, os dentes se engrenam e fazem a vedação, assim impedindo que o líquido bombeado retorne. Já as bombas com engrenagens internas sem crescente possuem um bombeamento similar ao das bombas com engrenagens externas.

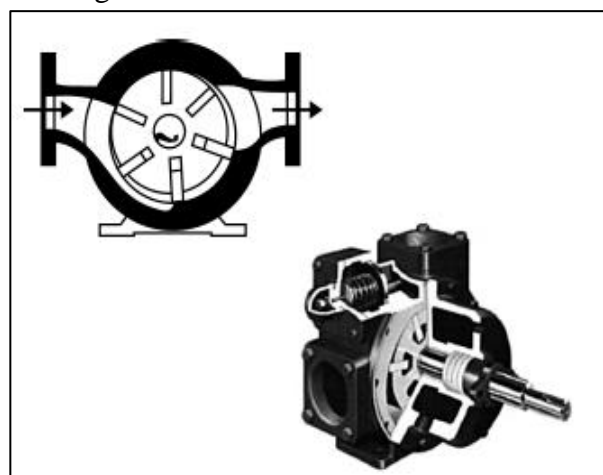
Figura 4: Bomba Rotativa de Engrenagens



Fonte: Adaptado de Drummond (2006)

Para Drummond, as bombas de palhetas possuem um rotor que gira excentricamente com a carcaça. Palhetas ficam alojadas nesse rotor e são expelidas por força centrífuga ou molas e mantêm contato com a carcaça da bomba. Ao girar, o rotor bloqueia o líquido em câmaras formadas pelas palhetas e o desloca até a descarga da bomba.

Figura 5: Bomba Rotativa de Palhetas

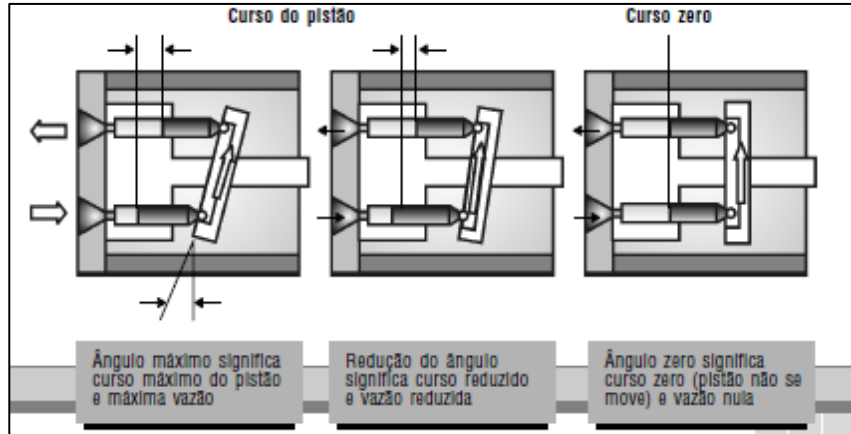


Fonte: Adaptado de Drummond (2006)

As bombas de pistão axial possuem um tambor cilíndrico e em seu interior pistões axiais geram uma ação de bombeamento, assim fazendo com que estes pistões se alterem

dentro do tambor. Além do tambor cilíndrico e pistões com mancais, estas bombas são constituídas por placa de deslizamento e placa de retenção, basicamente (AZEVEDO, 2009).

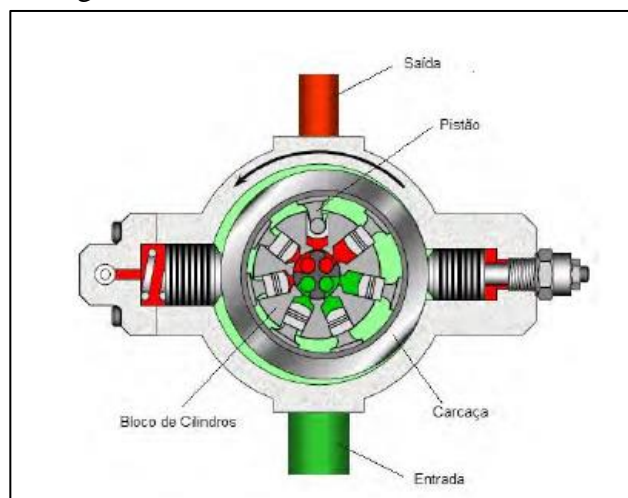
Figura 6: Bomba Rotativa de Pistão Axial



Fonte: Adaptado de Drummond (2006)

Para Azevedo, nas bombas de pistão radial, um conjunto gira em um pivô estacionário no interior de um rotor ou anel. Ao realizar movimento de giro, a força centrífuga faz com que os pistões sigam o controle de um anel, o qual é excêntrico em relação ao bloco dos cilindros. No momento em que os pistões realizam o movimento alternado dentro de seus furos, pórticos que ficam no pivô permitem aos pistões succionar o fluido localizado no pórtico e posteriormente descarregar o fluido no pórtico de saída quando os pistões são forçados pelo contorno do anel em direção ao pivô.

Figura 7: Bomba Rotativa de Pistão Radial

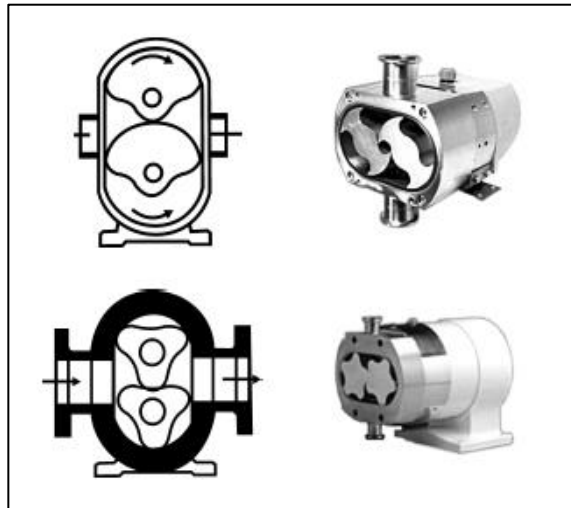


Fonte: Adaptado de Azevedo (2009)

As bombas de lóbulos são dotadas de dois rotores dentro de sua carcaça, os quais giram em sentido contrário. Devido ao formato dos rotores, ao realizar o giro, os mesmos

aprisionam na sucção um volume de líquido entre a carcaça e os lóbulos, volume esse que é deslocado e liberado em seguida pela descarga. Estes tipos de bombas podem se apresentar com um, dois, três e cinco lóbulos (DRUMMOND, 2006).

Figura 8: Bomba Rotativa Lobular



Fonte: Adaptado de Azevedo (2009)

2.2 TURBOBOMBAS

As turbobombas, também conhecidas como bombas rotodinâmicas, são caracterizadas por possuírem um item rotatório com pás, denominado rotor, o qual exerce sobre o líquido forças resultantes da aceleração promovido do rotor ao líquido. O rotor, também chamado de impelidor ou impulsor, possui a finalidade de fornecer aceleração ao líquido para que este adquira energia cinética, assim ocorrendo a transformação da energia mecânica. Os rotores também apresentam-se em duas formas, podendo ser rotor aberto e rotor fechado (MACINTYRE, 2011).

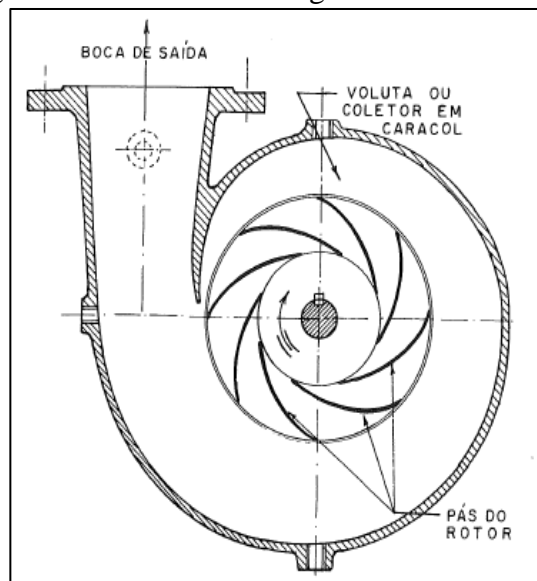
Figura 9: Rotor de Turbobomba aberto e fechado



Fonte: Adaptado de Macintyre (2011)

Conforme Mancintyre (2011), as turbobombas necessitam de outro componente, chamado de difusor, aonde ocorre a transformação de uma parte da energia cinética em energia de pressão. Assim, quando o fluido atinge a boca de saída da bomba, o mesmo é capaz de escoar com uma velocidade razoável, equilibrando a pressão que opõe-se ao escoamento. Conforme o tipo de turbobomba, o difusor pode ser de tubo reto troncônico ou com caixa em forma de caracol ou voluta, sendo no primeiro caso aplicado em bombas axiais e no segundo caso é aplicado nos demais tipos bombas.

Figura 10: Bomba Centrífuga em caixa em voluta



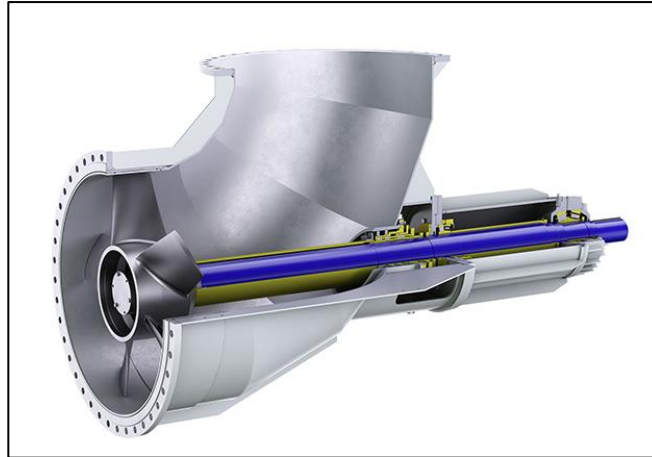
Fonte: Adaptado de Macintyre (2011)

Segundo Santos (2007), as turbobombas ou dinâmicas, são classificadas em quatro tipos: Bomba Axial, Bomba Centrífuga Diagonal, bomba Centrífuga Helicoidal, bomba Centrífuga Radial.

2.2.1 Bomba Axial

Nestas bombas o fluido entra axialmente, passando pelo rotor e transformando suas partículas em hélices de formato cilíndrico e na saída do rotor o escoamento do fluido é paralelo ao eixo da bomba. A energia que é transmitida ao fluido, nesse tipo de bomba, é devida às forças de arrasto, sendo que, a força centrífuga gerada pela rotação da pás do rotor não é responsável pelo aumento da pressão. As bombas axiais são utilizadas em casos onde a vazão é mais visada em relação às cargas atendidas por ela (SANTOS, 2007).

Figura 11: Bomba Axial

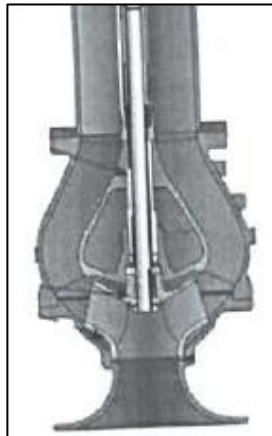


Fonte: Adaptado de Sulzer (2019)

2.2.2 Bomba Centrífuga Diagonal

Conforme Santos (2007), estas bombas são chamadas também de semi-axiais, sendo que, o fluido entra axialmente no rotor. A trajetória ao passar pelos canais formados pelas pás do rotor da bomba é em formato de hélice cônica para este tipo de bomba. A energia que é fornecida ao líquido é fornecida por duas forças, sendo uma parte de energia por força centrífuga e outra parte por força de arrasto. A bomba centrífuga diagonal é voltada para utilização aonde se busca maiores vazões.

Figura 12: Bomba Centrífuga Diagonal



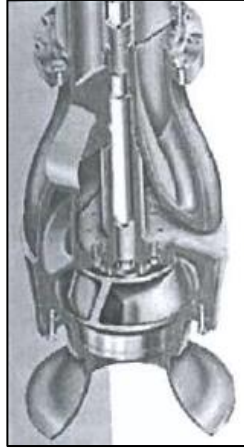
Fonte: Adaptado de Santos (2007)

2.2.3 Bomba Centrífuga Helicoidal

A bomba Centrífuga Helicoidal é também chamada de Francis. O fluido entra axialmente no rotor da bomba e segue uma trajetória em curva reversa. A energia que é fornecida ao fluido é provinda de forças centrífugas e uma parte de forças de arrasto, sendo

esta bomba utilizada em aplicações com cargas manométricas e vazões médias (SANTOS, 2007).

Figura 13: Bomba Centrífuga Helicoidal

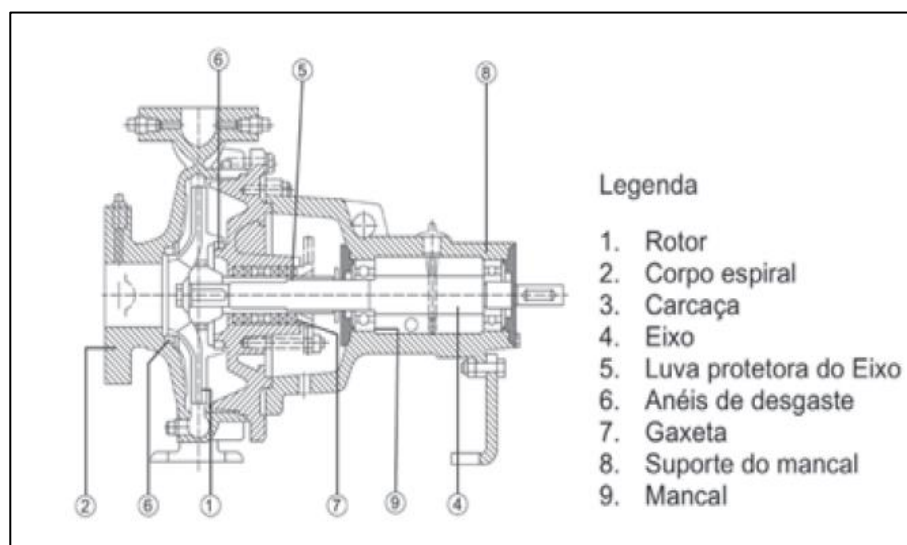


Fonte: Adaptado de Santos (2007)

2.2.4 Bomba Centrífuga Radial

As bombas centrífugas radiais são também denominadas como bomba centrífuga radial pura. Nestas bombas, o líquido entra pelo centro do rotor, passando por canais formados pelas pás localizadas no interior do rotor, o qual posteriormente, devido a sua alta velocidade de rotação, lança o líquido pela sua periferia, devido à ação da força centrífuga (PROCEL, 2009).

Figura 14: Bomba Centrífuga Radial



Fonte: Adaptado de Procel (2009)

Segundo o autor, as bombas centrífugas radiais são classificadas de acordo com a quantidade de rotores, tipo de carcaça e rotor, posição do eixo e número de entradas de líquido para aspiração.

Conforme Procel, na classificação conforme a quantidade rotores pode-se encontrar na configuração de simples estágio e múltiplos estágios, ou seja, com um rotor para o primeiro caso e múltiplos rotores para o segundo caso. Já na classificação conforme carcaça pode-se encontrar do tipo bipartida aberta na lateral, bipartida aberta na parte superior e multicelular. Os tipos de rotores podem ser classificados como aberto, semi-aberto e fechado, sendo cada um aplicado conforme especificado no manual do fabricante. Para a posição do eixo, as bombas classificam-se como eixo horizontal do rotor em balanço, eixo horizontal do rotor em mancais, eixo horizontal do rotor em balanço acoplado ao motor elétrico de acionamento e eixo vertical do rotor em balanço. Por fim, a classificação conforme número de entradas se dá de duas formas, sendo com aspiração de sucção simples e aspiração com sucção dupla.

2.3 CAVITAÇÃO

Segundo Henn (2006), “a cavitação (*cavitation*) consiste na formação e subsequente colapso, no seio de um líquido em movimento, de bolhas ou cavidades preenchidas, em grande parte, por vapor do líquido.”.

No momento em que a vaporização do líquido atinge certa intensidade, no interior da bomba, pode-se perceber um ruído semelhante a batidas de pedras. A bomba apresenta oscilações nos manômetros, tanto de sucção quanto os de descarga e, também, a bomba começa a apresentar vibração elevada. A pressão de descarga e a vazão ficam prejudicadas, podendo até a bomba deixar de bombear, devido ao desgaste excessivo nos impelidores (DRUMMOND, 2006).

Em projetos de instalação de bombas, um ponto muito importante a ser considerado é a cota de elevação relativa entre a bomba e a superfície do líquido no reservatório de fornecimento. Quando a bomba é instalada acima do reservatório de alimentação da mesma, a pressão fica menor que a pressão atmosférica, assim correndo o risco de a bomba cavitare (HOUGHTALEN; HWANG; AKAN, 2012).

Figura 15: Rotor danificado por cavitação



Fonte: Adaptado de Procel (2009)

Diversos parâmetros são utilizados na caracterização do início da cavitação. Quando a cavitação é oriunda por itens que reduzem a pressão, como diafragmas, curvas, saliências, entre outros, o coeficiente de cavitação é definido por (Henn, 2006):

$$\sigma = \frac{p_r - p_v}{\rho \cdot c^2 / 2} \quad (1)$$

Onde:

σ é o coeficiente de cavitação [-]

p_r é a pressão referência do líquido [Pa]

p_v é a pressão de vaporização do líquido à temperatura considerada [Pa]

ρ é a massa específica do líquido [kg/m³]

c é a velocidade do líquido num ponto ou numa seção de referência [m/s]

Para obter-se valores mais ligados ao sistema de instalação, substitui-se este coeficiente de cavitação por outro chamado de coeficiente de Thoma (*Thoma's cavitation coefficient*), obtendo então (HENN, 2006):

$$\sigma = \frac{\Delta p_s / \gamma}{H} \quad (2)$$

Onde:

σ é o coeficiente de cavitação de Thoma [-]

Δp_s é a depressão suplementar [kgf/m²]

γ é o peso específico do líquido [kgf/m³]

H é a altura de elevação da bomba [m]

Segundo Henn, o coeficiente de Thoma depende dos detalhes construtivos da máquina para reduzir o risco de cavitação, principalmente da forma do rotor, ou seja, da velocidade de rotação específica. Portanto, considera-se o coeficiente de Thoma como sendo uma medida de sensibilidade de uma bomba à cavitação, assim variando com a velocidade de rotação específica (η_{qA}).

Para o autor, esse coeficiente corresponde a um valor que é situado no início da cavitação, e é considerado como σ_{\min} , sendo este valor obtido em tabelas experimentais, curvas ou equações.

A equação para determinação do σ_{\min} em bombas hidráulicas é (HENN, 2006):

$$\sigma_{\min} = 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot \eta_{qA}^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

Onde:

σ_{\min} é o coeficiente de Thoma mínimo [-]

η_{qA} é a velocidade de rotação específica [-]

2.4 NPSH – NET POSITIVE SUCTION HEAD

Durante o bombeamento de líquidos, a pressão na linha de sucção nunca deve ser reduzida ao ponto em que o líquido vaporize. A energia disponível para transportar o líquido através da tubulação de sucção e no interior do rotor, sem que haja risco de vaporização define-se como “a energia total na sucção menos a energia correspondente à pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento”. Denomina-se NPSH (*Net Positive Suction Head*) a energia disponível por unidade de peso, a qual é medida na boca de sucção da bomba, traduzida para o português como Saldo Positivo de Altura de Sucção (HENN, 2006).

O NPSH pode ser expresso por (HENN, 2006):

$$NPSH_d = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{c_3^2}{2g} - \frac{p_v}{\gamma} \quad (4)$$

Onde:

$NPSH_d$ é o saldo positivo de altura de sucção [mca]

p_3 é a pressão na boca de sucção da bomba [kgf/m²]

γ é o peso específico do líquido bombeado [kgf/m³]

c_3 é a velocidade do líquido na boca de sucção da bomba [m/s]

g é a aceleração da gravidade [m/s²]

p_v é a pressão de vaporização do líquido na temperatura de bombeamento [kgf/m²]

Segundo o autor, devido a algumas dificuldades em obter-se a pressão e a velocidade na boca de sucção da bomba para o cálculo do $NPSH_d$, realizam-se alguns balanços de energia e ajustes a fim de obter uma equação mais prática, sendo:

$$NPSH_d = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} - H_{sg} - H_{ps} + \frac{c_2^2}{2g} \quad (5)$$

Onde:

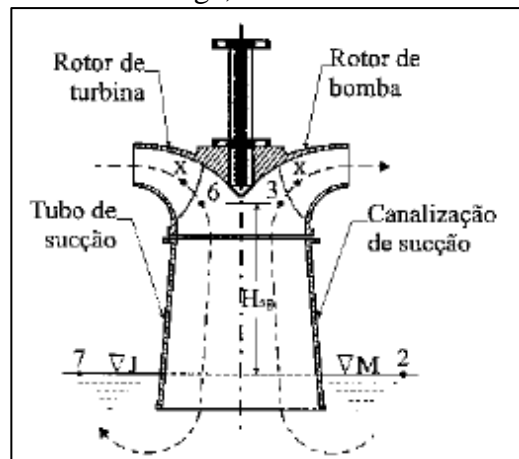
p_2 é a pressão existente na superfície do reservatório de sucção [kgf/m²]

H_{sg} é a altura de sucção geométrica [mca]

H_{ps} é a perda de carga na tubulação de sucção [mca]

c_2 é a velocidade do líquido na superfície do reservatório de sucção [m/s]

Figura 16: Esquemático da canalização de sucção e do rotor de uma bomba centrífuga, à direita do eixo vertical



Fonte: Adaptado de Henn (2006)

Para Henn, cada bomba necessita em sua boca de sucção uma quantidade de energia $NPSH_b$, para que não exista cavitação, sendo esta quantidade de energia específica denominada NPSH requerido e é expresso em metros de coluna d'água (mca), este depende das características construtivas da bomba e de propriedades do líquido (viscosidade).

Para obtenção do $NPSH_b$, temos (PFLEIDERER, 1960):

$$NPSH_b = \lambda_1 \cdot \frac{W_3^2}{2g} + \lambda_2 \cdot \frac{c_3^2}{2g} \quad (6)$$

Onde:

$NPSH_b$ é a energia específica requerida pela bomba para que não haja risco de cavitação [mca]

λ_1 é um valor empírico estimado para bombas existentes no mercado, este sendo igual a 0,3 [-]

W_3 é a velocidade relativa da corrente, medida na boca de sucção diante da aresta de entrada do rotor [m/s]

λ_2 é um valor empírico estimado para bombas existentes no mercado, este sendo igual a 1,2 [-]

Conforme Henn (2006), para evitar a cavitação na linha de sucção do bombeamento, o NPSH requerido pela bomba, deve ser menor do que o NPSH disponível, ou seja, $NPSH_d \geq NPSH_b$.

2.5 CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBAS

As curvas características das bombas são fornecidas pelos respectivos fabricantes. Estas curvas são representações do desempenho operacional destas bombas, curvas as quais são representadas graficamente. Os fabricantes realizam os testes das bombas em laboratório e também em alguns casos em campo, para poder analisar mais detalhadamente o resultado (HOUGHTALEN; HWANG; AKAN, 2012).

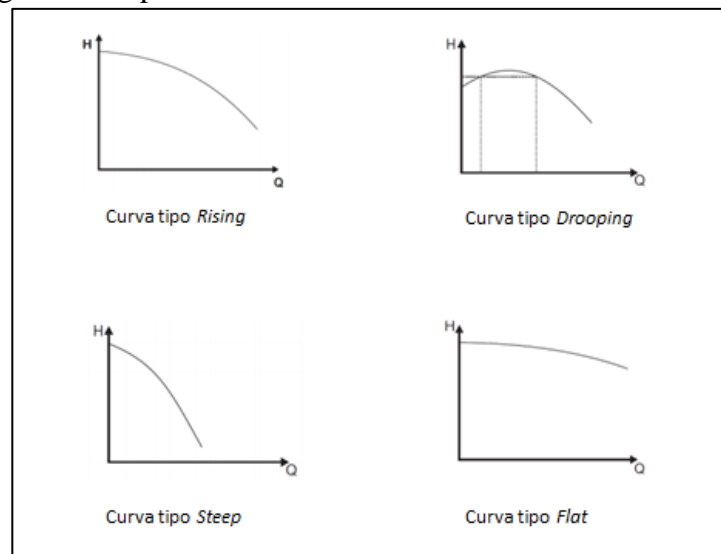
A determinação da curva característica de carga (H) x vazão (Q) de uma bomba, apresenta uma unidade de medida para a carga como sendo a energia por unidade de peso, assim sendo, essas curvas fornecidas pelos fabricantes apresentam a carga, geralmente como (DE MATTOS; DE FALCO, 1998):

$$\frac{kgf \times m}{kgf} = m \quad \text{ou} \quad \frac{lbf \times ft}{lbf} = ft$$

Segundo os autores, a curva carga *versus* vazão possui diferentes nomenclaturas, sendo estas definidas conforme suas formas. Estas nomenclaturas são definidas como curvas inclinadas (*Rising*), curvas ascendentes/descendentes (*Drooping*), curvas altamente descendentes (*Steep*) e curvas planas (*Flat*).

Na curva inclinada, a carga aumenta continuamente conforme a vazão diminui. Já na curva ascendente/descendente, quando a vazão for zero, a carga será menor em relação as cargas para outras vazões. Para a curva altamente descendente, existe uma diferença considerável entre a carga na vazão zero e a carga na vazão de projeto. Por fim, na curva plana, a carga demonstra uma variação pequena com a variação da vazão (DE MATTOS; DE FALCO, 1998).

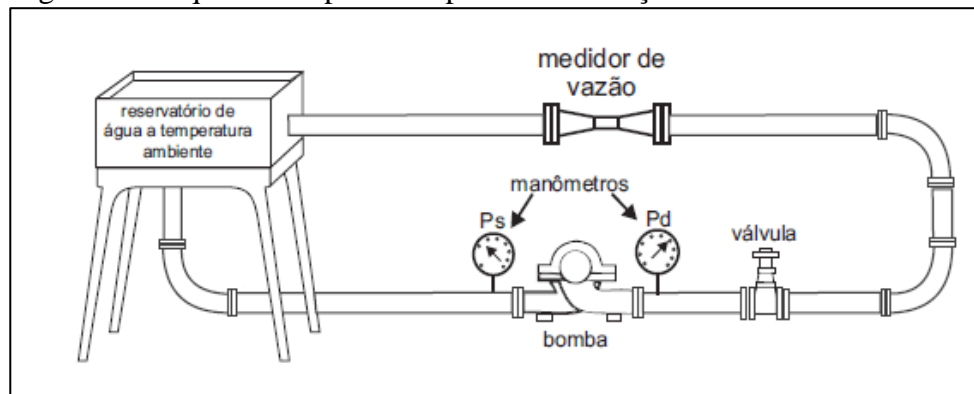
Figura 17: Tipos de curvas características de bombas centrífugas



Fonte: Adaptado de Roberto e Santos (2014)

A obtenção das curvas características de uma bomba centrífuga pode ser obtida através de um sistema simplificado, conforme Figura 18. Para isso, considera-se que P_s seja a pressão de sucção, que é medida próximo ao flange de sucção da bomba e P_d é a pressão de descarga, medida próxima ao flange de descarga da bomba (KSB, 2003).

Figura 18: Esquema simplificado para determinação de curvas característica



Fonte: Adaptado de KSB (2003)

Para a determinação da curva, KSB (2003) instrui a colocar a bomba em funcionamento com o a válvula da descarga fechada, para termos uma vazão igual à zero, ou seja, $Q=0$ (*shut-off*). Observando a pressão mostrada no manômetro da descarga da bomba, obtém-se a pressão quando a vazão é zero. A altura é definida pela expressão:

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (7)$$

Onde:

H é a altura manométrica desenvolvida pela bomba [mca]

P_d é a pressão de descarga [kgf/cm²]

P_s é a pressão de sucção [kgf/cm²]

Para (DE MATTOS; DE FALCO, 1998), para a definição da carga H do sistema, calcula-se através da Equação 8:

$$H = h_d - h_s \quad (8)$$

Onde:

h_d é altura manométrica de descarga [mca]

h_s é altura manométrica de sucção [mca]

Conforme os autores, para a definição do h_s , pode ser usado o teorema de Bernoulli, tomando como referência um ponto na superfície livre do reservatório de sucção e o flange de

sucção da bomba. Sendo assim, o h_s é determinado como a energia por unidade de peso na sucção, menos as perdas na linha de sucção para a vazão aplicada.

Já para o cálculo do h_d , De Mattos e De Falco (1998) utilizam também a teoria de Bernoulli, aplicando-a entre o flange de descarga da bomba e o ponto final de descarga do líquido. Assim, o h_d define-se como a energia por unidade de peso na descarga, mais as perdas na linha de recalque para a vazão aplicada.

Existem alguns fatores que influenciam e alteram as curvas características das bombas. Um dos fatores é o peso específico γ , já, um segundo fator é a viscosidade do fluido e um terceiro fator é a influência do tamanho da bomba, o qual, mesmo comparando duas bombas semelhantes de grande porte, haverá uma diferença nos resultados dos testes, devido as suas folgas e imperfeições serem de relativamente maiores, dado o tamanho das bombas também ser maior (MACINTYRE, 1997).

2.6 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

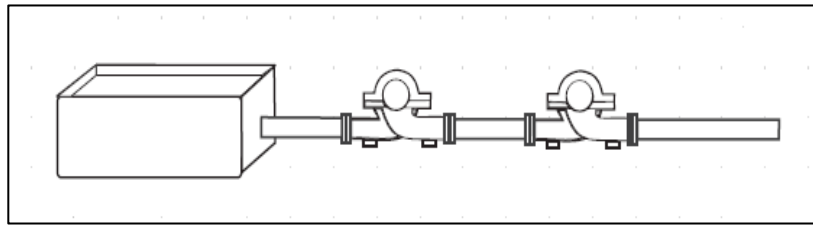
A associação de bombas é muito utilizada em diversas instalações de diversos segmentos. Este tipo de associação pode ser feito em série ou paralelo e visa reduções de custos de projetos, garantir a segurança de operação e flexibilizar a manutenção das bombas (HENN, 2006).

Em inúmeras aplicações de sistemas de bombeamento, existe uma gama de variações em descargas e alturas manométricas. Muitas vezes estes sistemas necessitam de instalações que abrangem mais que uma única bomba. Para isso pode-se recorrer para montagens com associações de bombas, que podem ser em série ou paralelo (MACINTYRE, 1997).

2.6.1 Associação em série

Segundo Santos (2007), a associação de bombas em série é utilizada para obtenção de cargas manométricas elevadas e desproporcionais em relação à vazão. Porém, o autor reforça que para uma montagem deste tipo, deve-se sempre observar se a carcaça da última bomba da associação suporta a pressão desenvolvida, no caso de associação de mais de duas bombas.

Figura 19: Montagem associação com duas bombas em série



Fonte: Adaptado de KSB (2003)

Observa-se através da Figura 19 que, o líquido passa pela primeira bomba e recebe uma quantidade de energia de pressão, posteriormente entra na segunda bomba, aonde recebe um acréscimo de energia, assim atingindo as condições solicitadas. Percebe-se também, que a vazão que sai da primeira bomba é a mesma é igual à vazão que entra na segunda bomba, sendo assim, uma associação de bombas em série possui uma vazão constante. A pressão total, ou seja, a altura manométrica, é a soma das pressões (altura) que cada bomba fornece (KSB, 2003).

Para associação de duas bombas em série, Henn (2006) expressa o salto energético e a vazão como:

$$Y_A = Y_I + Y_{II} \quad (9)$$

$$Q_A = Q_I = Q_{II} \quad (10)$$

Onde:

Y_A é o salto energético específico da associação [J/kg]

Y_I é o salto energético ou trabalho específico da bomba I [J/kg]

Y_{II} é o salto energético ou trabalho específico da bomba II [J/kg]

Q_A é a vazão da associação [m³/s]

Q_I é a vazão da bomba I [m³/s]

Q_{II} é a vazão da bomba II [m³/s]

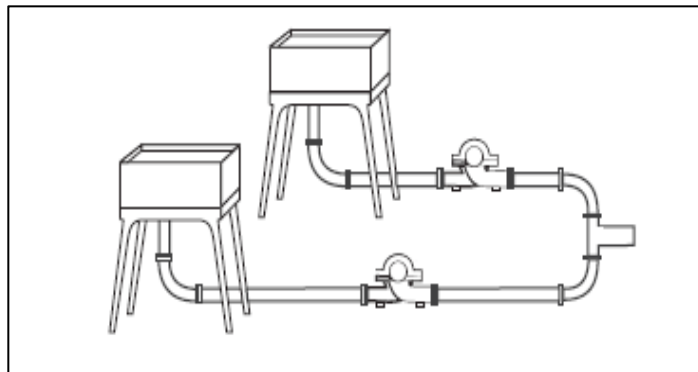
2.6.2 Associação em paralelo

De acordo com Henn (2006), a associação de bombas em paralelo é mais comumente utilizada, já que este tipo de montagem proporciona um aumento na capacidade de vazão do sistema. O autor comenta que este tipo de arranjo é aplicado em casos que uma bomba de

grande porte não dispõe de espaço físico para sua instalação, ou quando uma instalação com duas bombas menores proporciona um consumo energético menor que uma bomba de grande porte.

Quando existe uma operação de bombas montadas em paralelo, todas as bombas terão operantes terão a mesma altura manométrica, ou seja, para a mesma altura manométrica, teremos uma soma das vazões correspondentes das bombas (KSB, 2003).

Figura 20: Montagem associação com duas bombas em paralelo



Fonte: Adaptado de KSB (2003)

Para associação de duas bombas em paralelo, Henn (2006) expressa o salto energético e a vazão como:

$$Y_A = Y_I = Y_{II} \quad (11)$$

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

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A montagem do equipamento e os testes realizados no presente trabalho foram desenvolvidos nas instalações da Universidade de Caxias do Sul, localizada no Campus Universitário da Região dos Vinhedos, em Bento Gonçalves. A bancada montada ficou localizada em umas das salas do Laboratório da Universidade citada.

O desenvolvimento do projeto foi realizado a partir do software Solidworks 2013, no qual foram desenhados os itens que compõem o equipamento e, posteriormente, realizada a montagem do equipamento no software citado. O projeto em 3D feito com o Solidworks pode ser visto no Apêndice A, o qual contempla um manual de operação do equipamento que será disponibilizado juntamente com a bancada. Para o desenvolvimento do fluxograma do equipamento e os diagramas elétricos de comando e força, foi utilizado o software Autocad 2014. O fluxograma da bancada pode ser visto no Apêndice B e os diagramas elétricos de comando e força no Apêndice C.

Os ensaios no equipamento foram realizados com o objetivo de validar o funcionamento do projeto desenvolvido, sendo que para isto, foi comparada a curva do catálogo das Bombas utilizadas com a curva obtida nos testes em laboratório.

3.1 EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTOS E MATERIAIS DE MONTAGEM

3.1.1 Bomba

As bombas utilizadas na bancada são da marca GAMMA, modelo QB60 com vazão máxima de 32 l/min e altura manométrica máxima de 20 mca, estas são equipadas com motor monofásico 220 V, 60 Hz, potência de 0,5 cv, corrente de 1,6 A e rotação de 3450 rpm. As conexões de sucção e recalque das bombas são de 1 polegada com roscas BSP.

A Figura 21 mostra a bomba utilizada na montagem do equipamento.

Figura 21: Bomba Gamma QB60



Fonte: Autor (2020)

3.1.2 Transdutores

Os transdutores de vazão são do tipo Turbina, da marca SIMOKIT, com capacidade de pressão máxima de 1,75 MPa, faixa de vazão de 2 a 100 l/min e uma corrente máxima de operação de 15 mA, com tensão de funcionamento de 5 a 24 V. A conexão dos transdutores são de 1 polegada, rosca macho BSP.

Os transdutores de pressão são da marca MC1, com escala de pressão de 0 a 10 bar, sinal de saída de 4 a 20 mA e fonte de alimentação de 9 a 32 V corrente contínua. A conexão dos transdutores são de ¼ de polegada, rosca macho BSP.

A Figura 22 mostra o transdutor de vazão utilizado na bancada, enquanto a Figura 23 mostra o transdutor de pressão.

Figura 22: Transdutor de vazão Simokit



Fonte: Autor (2020)

Figura 23: Transdutor de Pressão MC1



Fonte: Autor (2020)

3.1.3 Placa de Aquisição de Dados

A placa de aquisição de dados é do tipo módulo USB de aquisição de dados, da marca Measurement Computing, modelo USB-201, com 8 entradas analógicas e 8 saídas digitais, 12 bit, 100 ks/s e contador 32 bit.

A Figura 24 mostra a placa de aquisição de dados utilizada na bancada.

Figura 24: Placa de Aquisição de Dados USB-201 MC



Fonte: Autor (2020)

3.1.4 Tanque, tubos e acessórios

O tanque que serve para armazenamento da água utilizada nos experimentos possui um volume de 375 litros e é de um material plástico não identificado, devido ao mesmo não possuir especificações.

Os tubos e conexões foram utilizados em material PVC, na bitola de 1 polegada, para montar na conexão da mesma bitola da sucção e recalque das bombas GAMMA do modelo QB60.

Os acessórios, como válvulas esfera e válvulas gaveta, foram utilizadas na bitola de 1 polegada e do material de latão, o qual possui uma resistência satisfatória para a aplicação.

A Figura 25 mostra o tanque de água utilizado para os experimentos da bancada.

Figura 25: Tanque de água



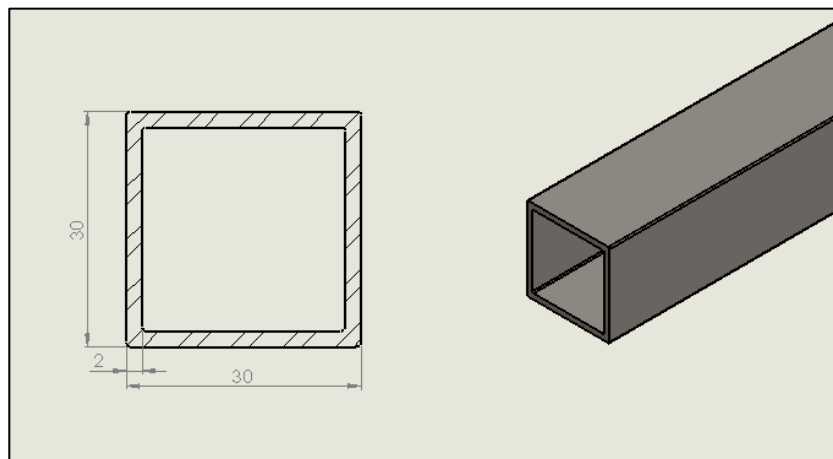
Fonte: Autor (2020)

3.1.5 Perfil metálico base bombas e base tanque

Os perfis metálicos são do tipo tubo quadrado de seção 30 x 30 mm, espessura de parede de 2 mm e material aço carbono.

A Figura 26 mostra o perfil utilizado para a confecção das bases metálicas.

Figura 26: Tubo quadrado 30 x 30 mm



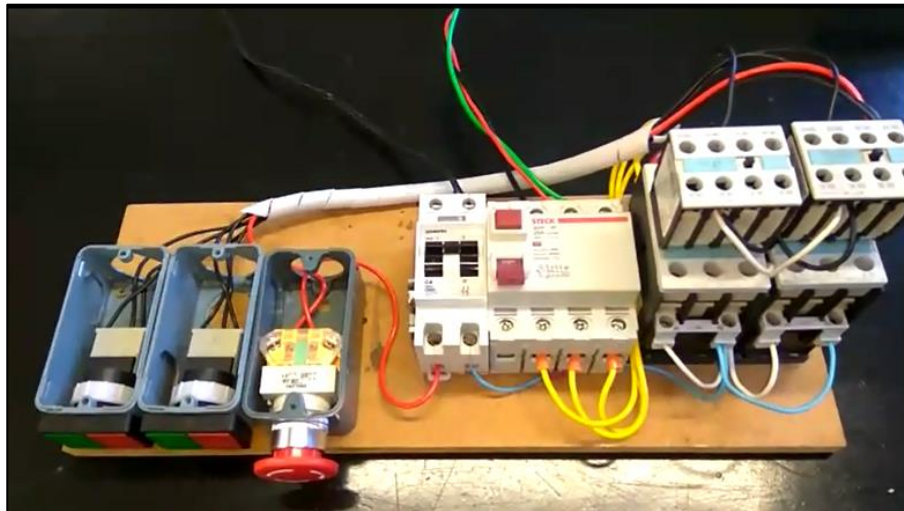
Fonte: Autor (2020)

3.1.6 Painel elétrico de comando e força

O quadro de comando e o comando de força foram montados de acordo com o projeto elétrico apresentado no Apêndice C.

A Figura 27 mostra o quadro de comando em fase final de montagem pelos técnicos do laboratório da Universidade.

Figura 27: Quadro de comando e força para acionamento das bombas



Fonte: Autor (2020)

3.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Para esta etapa do projeto, foram realizados testes com as bombas operando individualmente, em série e em paralelo. Para variação da pressão e vazão do sistema, foi adotado o método de abertura gradativa das válvulas globo situadas logo após o bocal de saída das bombas. Para o entendimento das etapas realizadas nos ensaios descritos, deve-se observar o Apêndice A contido no presente trabalho, o qual apresenta as numerações dos itens de montagem da bancada.

No ensaio com uma bomba individual, neste caso a Bomba 01, foi realizado o bloqueio da água do tanque para a alimentação da Bomba 02, através do fechamento da Válvula 02, de saída do tanque para alimentar a sucção desta bomba. Também foi realizado o fechamento das Válvulas 05 e 06 para bloquear a passagem de água para a Bomba 02. Com as Válvulas 01, 03 e 08 totalmente abertas, foi ligada a Bomba 01, assim obtendo um fluxo de vazão máximo da bomba. Gradativamente foi realizado o fechamento da Válvula 03, para ser obtido um valor de pressão e vazão diferentes, assim produzindo informações de leitura dos

transdutores de pressão e vazão instalados na tubulação da Bomba 01, sendo estes os Transdutores de Pressão 01 e 02 e o Transdutor de Vazão 01.

Para o ensaio das bombas operando em paralelo, foram fechadas as válvulas 05 e 07, para que as bombas tivessem o fluxo de água seguindo em uma tubulação somente, assim, o Transdutor de Vazão 01 medindo a vazão das duas bombas simultaneamente. Para a obtenção das informações em diferentes pressões e vazões, as Válvulas 03 e 04 foram fechadas gradativamente e simultaneamente. Neste caso, os Transdutores de Pressão 01 e 02 medem as pressões correspondentes da Bomba 01 e os Transdutores de Pressão 03 e 04 medem as pressões da Bomba 02. Neste caso, a medição de vazão foi dada somente pela leitura do Transdutor de Vazão 01.

Na realização do ensaio com as bombas dispostas em série, foi mantida a Válvula 02 fechada, para que a sucção da Bomba 02 fosse alimentada somente pelo recalque da Bomba 01. A Válvula 06 também foi mantida fechada, para que o fluxo de água seguisse somente em uma tubulação. Para a variação da vazão e pressão neste ensaio, realizou-se o fechamento gradativo da Válvula 04. Neste caso, a medição de vazão foi dada somente pela leitura do Transdutor de Vazão 02 e a medição das pressões foi realizada pelos Transdutores de Pressão 03 e 04.

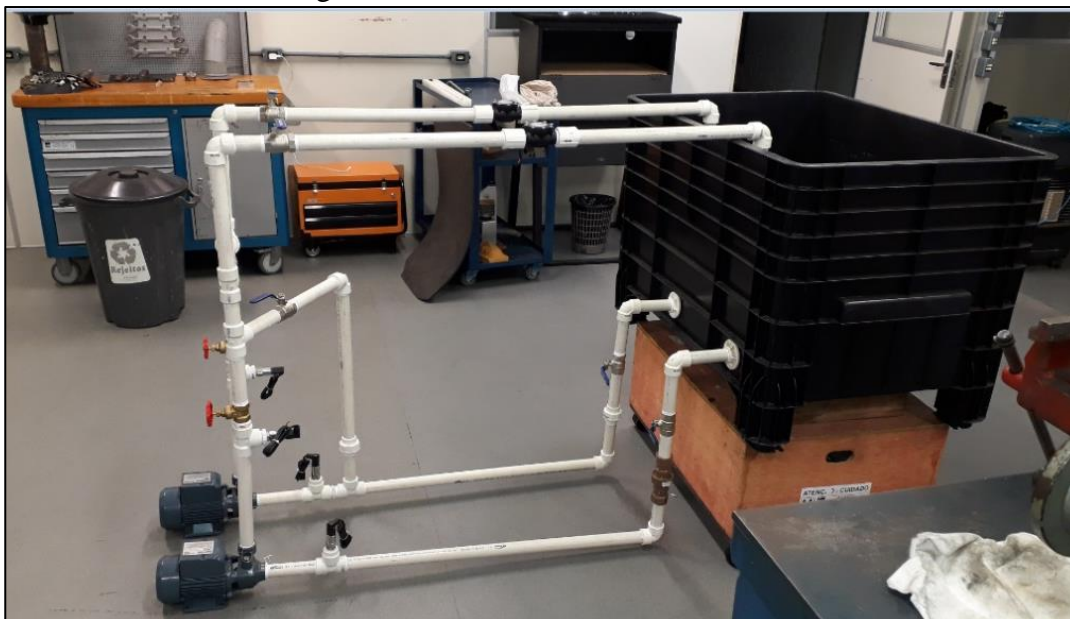
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentadas neste capítulo as curvas características oriundas de testes em bancada de duas bombas centrífugas. As curvas são provenientes de testes realizados com a operação das bombas em série, paralelo e operação individual. Também é apresentado no Apêndice D, as instruções para utilização da bancada, bem como o programa desenvolvido no *Matlab* para leitura dos transdutores.

Apresenta-se também a comparação da curva Pressão *versus* Vazão retirada do catálogo da Bomba QB60 em relação à curva obtida nos testes realizados na Bancada de Teste montada.

A Figura 28 mostra a bancada de teste de bombas que foi desenvolvida através da utilização dos materiais descritos no Capítulo 3, bem como os métodos descritos no capítulo citado.

Figura 28: Bancada de teste de Bombas



Fonte: Autor (2020)

4.1 CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO E VAZÃO

Através dos ensaios realizados a fim de adquirir a curva de calibração dos transdutores, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, para os transdutores de pressão e vazão, respectivamente. As curvas de calibração são apresentadas nas Figuras 29 e 30 para os transdutores de pressão e vazão, respectivamente e as equações

são apresentados através da Equação 13 para os transdutores de pressão e Equação 14 para os transdutores de vazão.

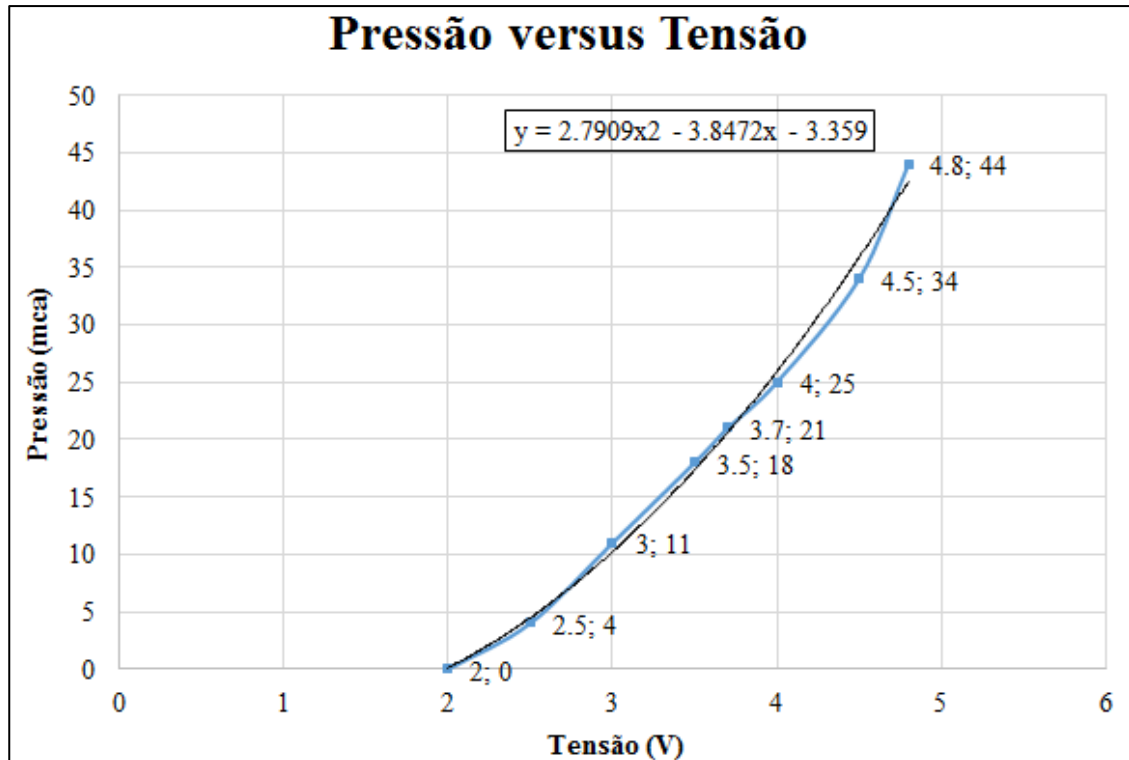
Durante os testes dos transdutores de pressão, observou-se que os Transdutores 01 e 03, responsáveis pela leitura da pressão de sucção das bombas, mostraram pressão igual a zero. Sendo assim, a pressão utilizada final é a pressão medida nos transdutores de pressão nas saídas das bombas.

Tabela 1: Valores de pressão e tensão dos Transdutores de Pressão

Tensão (V)	Pressão (mca)
2	0
2,5	4
3	11
3,5	18
3,7	21
4	25
4,5	34
4,8	44

Fonte: Autor (2020)

Figura 29: Curva Transdutor de Pressão



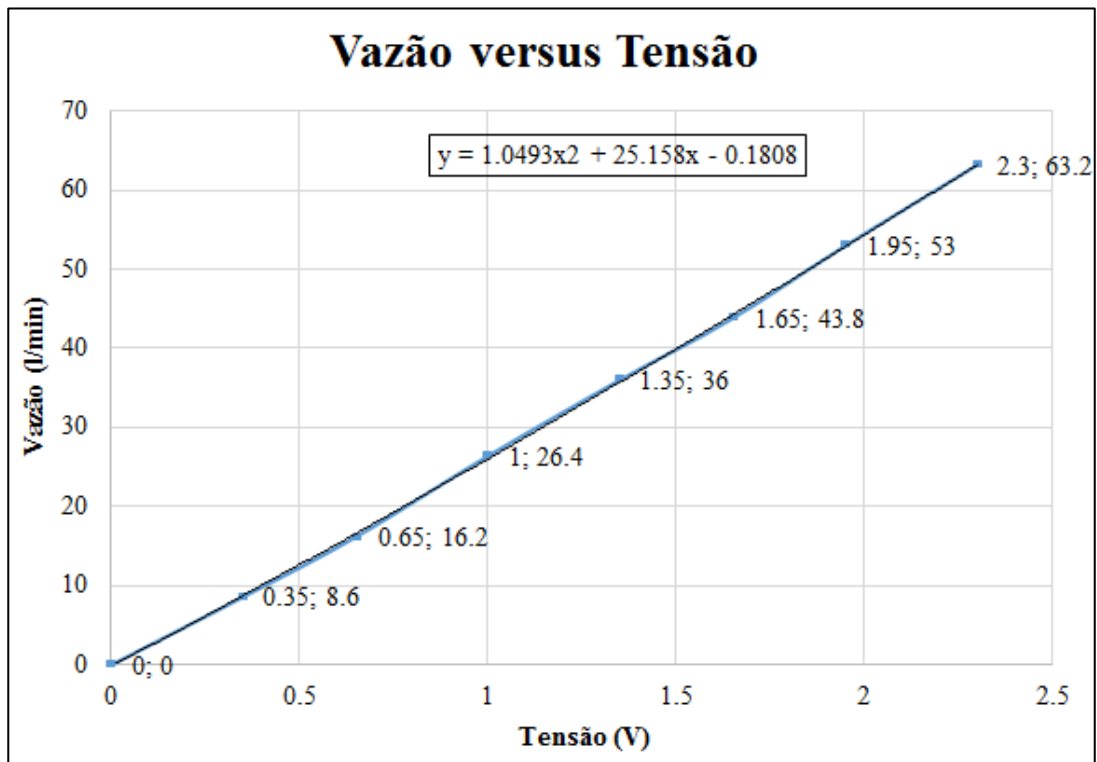
Fonte: Autor (2020)

Tabela 2: Valores de vazão e tensão dos Transdutores de Vazão

Tensão (V)	Vazão (l/min)
0	0
0,35	8,6
0,65	16,2
1	26,4
1,35	36
1,65	43,8
1,95	53
2,3	63,2

Fonte: Autor (2020)

Figura 30: Curva Transdutor de Vazão



Fonte: Autor (2020)

Através dos gráficos das Figuras 29 e 30, obtiveram-se as equações para realizar a transformação de tensão em volts para pressão em mca e a transformação de tensão em volts para vazão em l/min, assim fixando as unidades de medidas utilizadas para as curvas características das bombas.

Assim, as equações apresentam-se da seguinte forma:

$$P = 2,7909V^2 - 3,8472V - 3,359 \quad (13)$$

$$Q = 1,0439V^2 + 25,158V - 0,1808 \quad (14)$$

Onde:

P é a pressão exercida pela bomba [mca]

V é a tensão apresentada pelos transdutores de pressão e vazão [V]

Q é a vazão da bomba [l/min]

4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA OPERANDO INDIVIDUALMENTE

Para a construção da curva característica da bomba QB60 em operação individual, utilizaram-se os valores experimentais obtidos em ensaio, os quais são apresentados na

Tabela 3. Para a obtenção dos valores em pressão (mca) e vazão (l/min), utilizaram-se as Equações 13 e 14. Os dados da Tabela 3 foram obtidos através da média de 100 leituras realizadas pela placa de aquisição de dados e transmitidos para o *Matlab*, durante 10 segundos de operação da bomba.

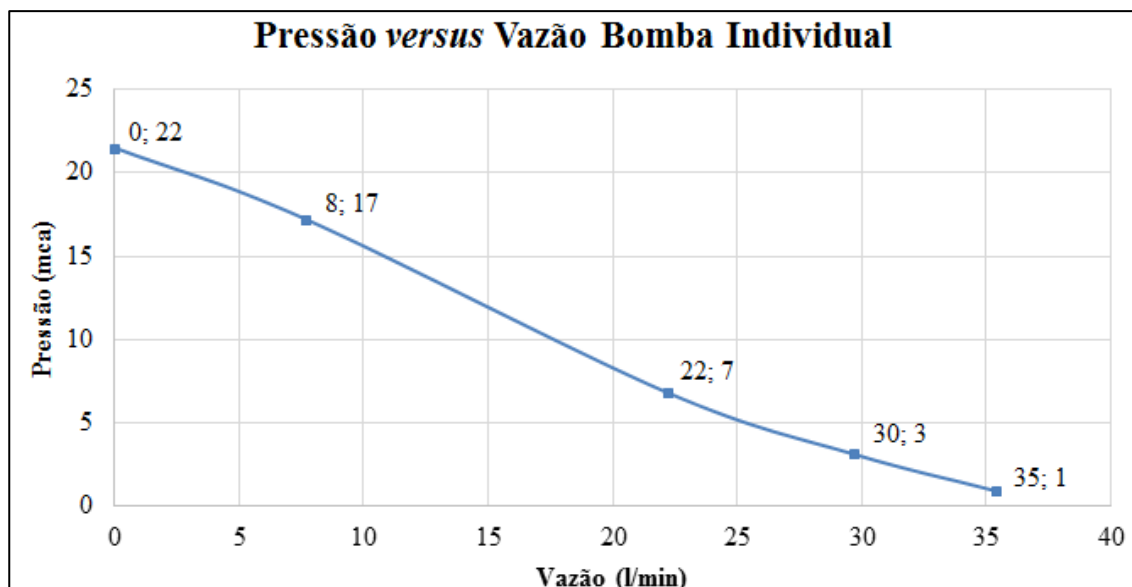
Tabela 3: Dados bomba operando individualmente

Vazão (l/min)	Pressão (mca)
35	1
30	3
22	7
8	17
0	22

Fonte: Autor (2020)

A partir dos dados da Tabela 3, pôde ser obtida a curva característica da bomba QB60 operando individualmente, a qual é apresentada na Figura 31.

Figura 31: Curva Pressão *versus* Vazão bomba operando individual



Fonte: Autor (2020)

4.3 CURVA CARACTERÍSTICA DAS BOMBAS OPERANDO EM SÉRIE

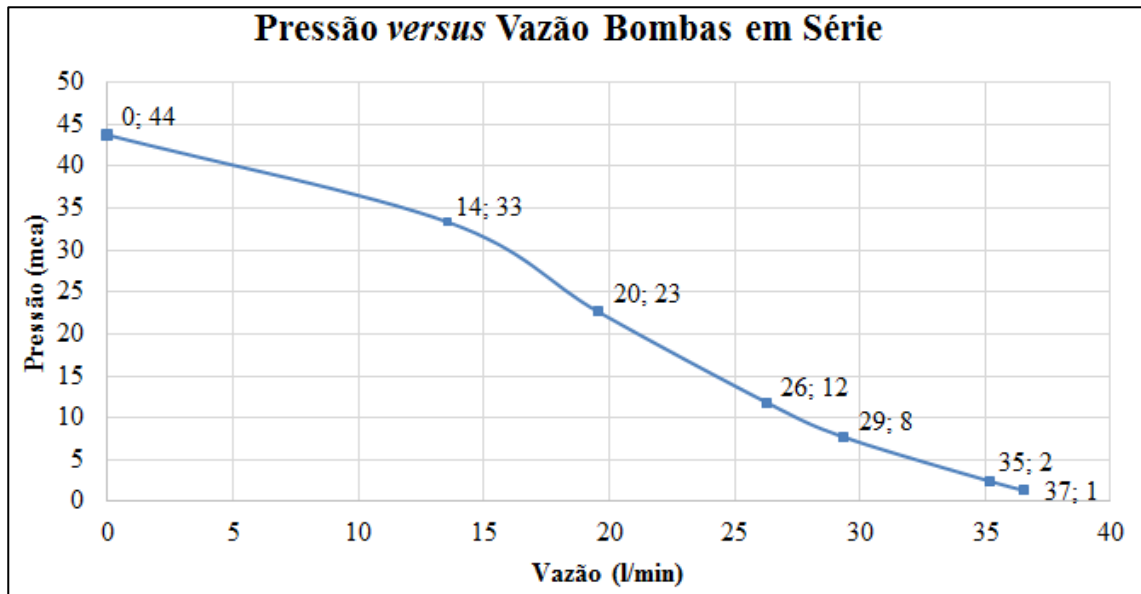
Para a obtenção da curva características das bombas em operação em série, foram utilizados os dados obtidos experimentalmente e apresentados na Tabela 4. Para a obtenção dos valores em pressão (mca) e vazão (l/min), utilizaram-se as Equações 13 e 14. Os dados da Tabela 4 foram obtidos através da média de 100 leituras realizadas pela placa de aquisição de dados e transmitidos para o *Matlab*, durante 10 segundos de operação da bomba.

Tabela 4: Dados bombas operando em série

Vazão (l/min)	Pressão (mca)
37	1
35	2
29	8
26	12
20	23
14	33
0	44

Fonte: Autor (2020)

A partir dos dados da Tabela 4, pôde ser obtida a curva característica das duas bombas QB60 operando em série, a qual é apresentada na Figura 32.

Figura 32: Curva Pressão *versus* Vazão bombas operando em série

Fonte: Autor (2020)

4.4 CURVA CARACTERÍSTICA DAS BOMBAS OPERANDO EM PARALELO

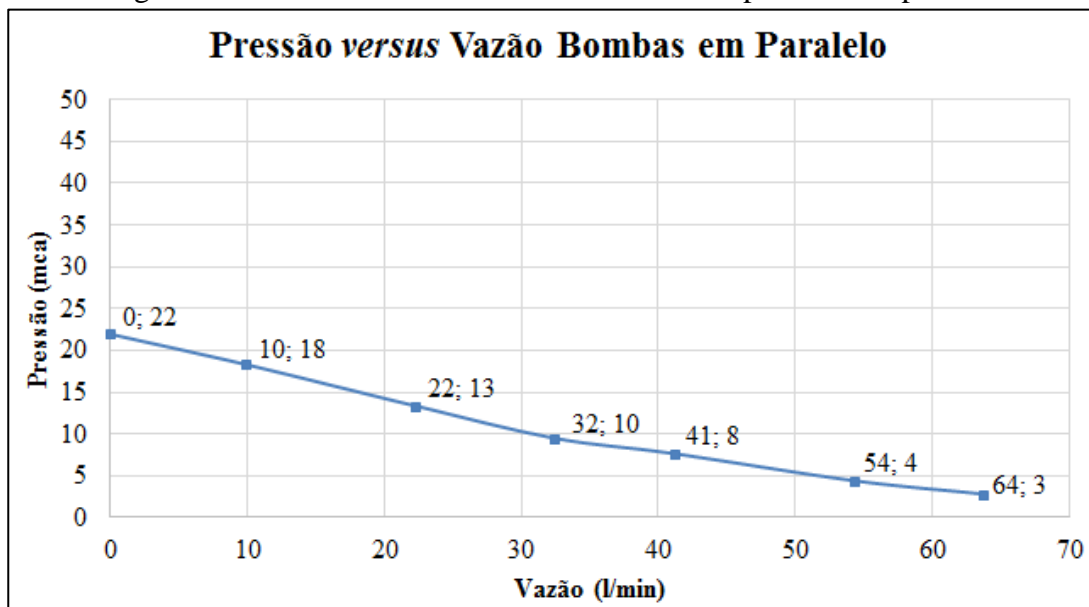
Para a obtenção da curva características das bombas operando em paralelo, foram utilizados os dados obtidos experimentalmente e apresentados na Tabela 5. Os métodos de equacionamento e leitura de dados foram aplicados da mesma forma dos experimentos anteriores.

Tabela 5: Dados bombas operando em paralelo

Vazão (l/min)	Pressão (mca)
64	3
54	4
41	8
32	10
22	13
10	18
0	22

Fonte: Autor (2020)

A partir dos dados da Tabela 5, pôde ser obtida a curva característica das duas bombas QB60 operando em paralelo, a qual é apresentada na Figura 33.

Figura 33: Curva Pressão *versus* Vazão bombas operando em paralelo

Fonte: Autor (2020)

4.5 COMPARATIVO ENTRE CURVA DO CATÁLOGO GAMMA E CURVA BANCADA UCS PARA BOMBA QB60

Através do catálogo da Gamma Ferramentas, verificou-se a curva das bombas QB60, com a finalidade de realizar o comparativo da curva do fornecedor do produto e a curva gerada com a bancada montada no laboratório da Universidade.

A Tabela 6 e a Figura 33 apresentam, respectivamente, os dados e a curva referente ao catálogo da Ferramentas Gamma para a bomba QB60.

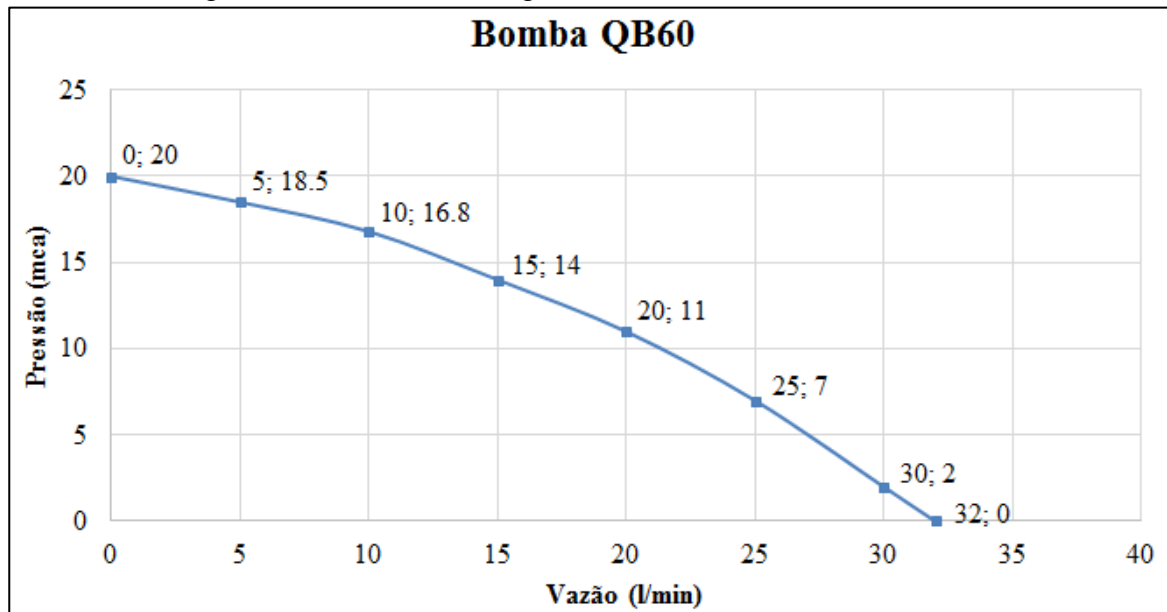
Tabela 6: Dados bomba QB60 catálogo Ferramentas Gamma

Vazão (l/min)	Pressão (mca)
32	0
30	2
25	7
20	11
15	14
10	16,8
5	18,5
0	20

Fonte: Autor (2020)

Com os dados coletados na Tabela 6, foi construída a curva da bomba QB60, apresentada na Figura 34.

Figura 34: Curva do catálogo Ferramentas Gamma bomba QB60

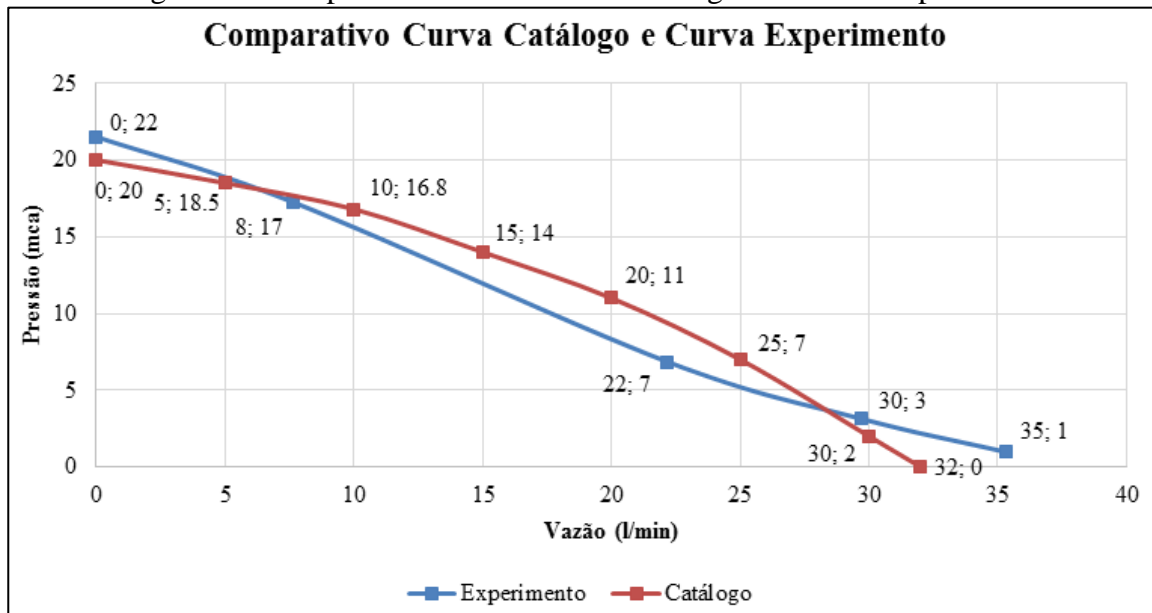


Fonte: Autor (2020)

Após os ensaios experimentais e a análise dos dados no catálogo do fornecedor das bombas utilizadas para o experimento no laboratório, pode-se perceber uma semelhança considerável na comparação entre a Tabela 3 e a Tabela 6, as quais apresentam os valores do ensaio experimental para uma bomba operando individualmente no laboratório e os valores do ensaio realizado pelo fornecedor da bomba, respectivamente. Esta diferença apresentou-se com um valor 10% maior da pressão máxima do experimento em relação à pressão máxima do catálogo. Em relação à vazão, foi obtido um valor 9,4% maior do experimento em relação ao catálogo.

A Figura 35 apresenta um gráfico com as duas curvas comparadas, onde se pode fazer uma análise visual dos comportamentos.

Figura 35: Comparativo entre curva do catálogo e curva do experimento



Fonte: Autor (2020)

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi desenvolvida uma bancada de testes para bombas centrífugas, a qual tem o intuito de ser utilizada em aulas práticas no laboratório da Universidade de Caxias do Sul, campus Bento Gonçalves. As curvas características que esta bancada desenvolve são utilizadas em catálogos de fabricantes de bombas, para que seja possível analisar e definir através delas o equipamento ideal para uma aplicação específica, observando-se a pressão e vazão desenvolvida em certo ponto da curva.

A partir da revisão bibliográfica, foram introduzidos conceitos básicos dos tipos de bombas disponíveis para a utilização em aplicações específicas, bem como o funcionamento destas. Também, foram mostradas teorias e configurações de montagens para a obtenção das curvas de bombas centrífugas, considerando uma bomba operando individualmente, duas bombas operando em série e duas bombas operando em paralelo.

Através da análise, entendimento das teorias e modelos vistos na revisão bibliográfica do presente trabalho, foi realizada a montagem da bancada proposta no presente trabalho. As informações necessárias para o desenvolvimento das curvas das bombas, sendo os dados de pressão e vazão, foram obtidas de forma satisfatória, através da utilização dos itens e do procedimento descrito no Capítulo 3 deste trabalho.

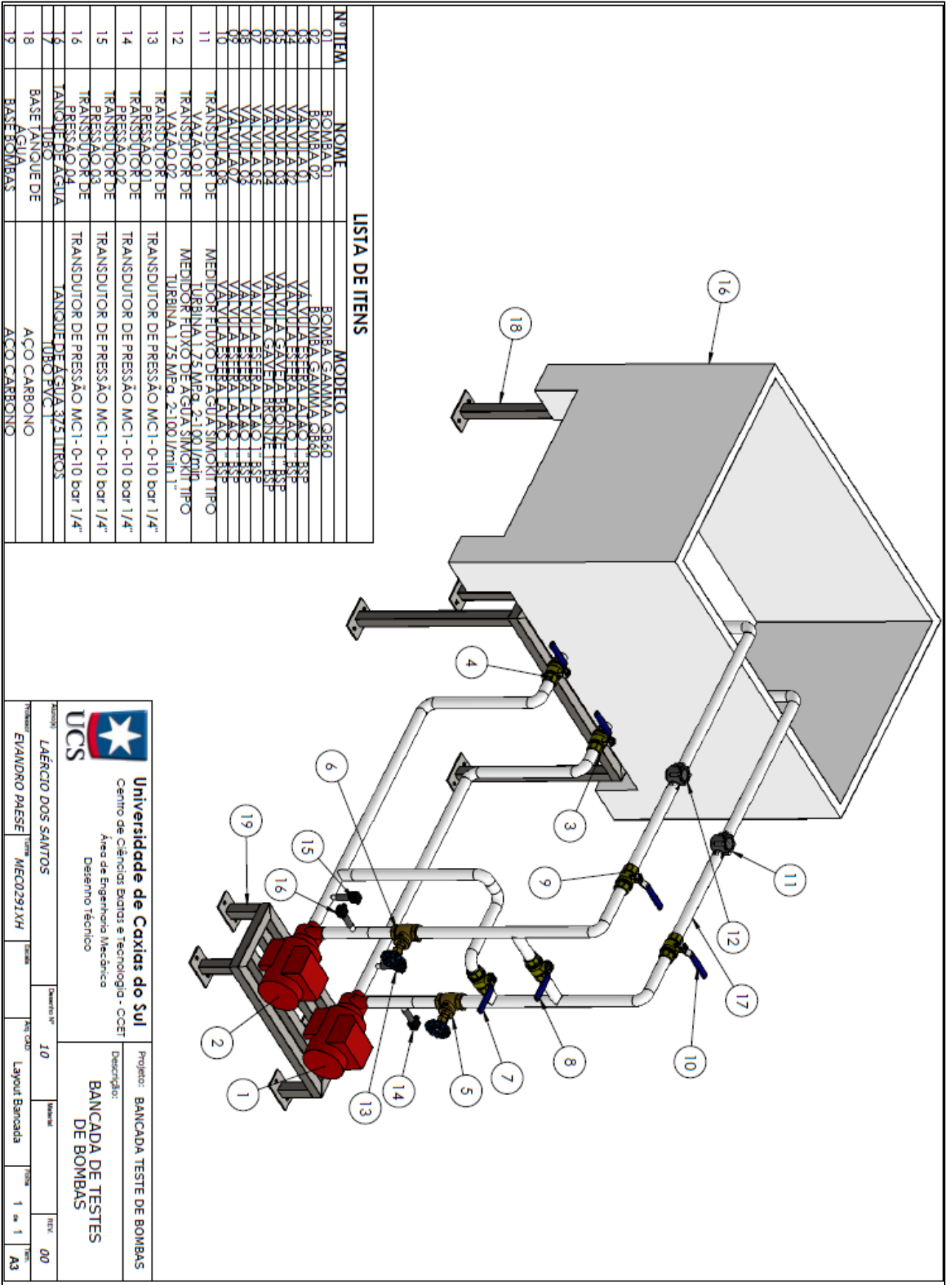
Os resultados foram apresentados no Capítulo 4, aonde foram mostrados os dados e a curva do catálogo do fornecedor da bomba QB60, podendo assim realizar um comparativo dos dados e a curva obtida no ensaio experimental em laboratório, o qual foi realizado com a bancada desenvolvida. O resultado obtido foi considerado satisfatório, já que no comparativo realizado entre os dados analisados observou-se uma proximidade interessante.

Por fim, considera-se que o objetivo do presente trabalho foi atingido com êxito. Através dos objetivos propostos, pode-se afirmar que aplicando as teorias e modelos estudados, promissores resultados são obtidos, assim concluindo o presente trabalho com objetivos alcançados.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, G.J.R. **Projeto e Construção de uma Bomba de Pistões Axiais Tipo SW Ashplate de Vazão Variável**. 2009. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- DE MATTOS, E.E.; DE FALCO, R. **Bombas Industriais**. 2ª ed. Rio de Janeiro, Interciência, 1998.
- DRUMMOND, G.V. **Manutenção e Reparo de Bombas**. Programa de atualização para mecânicos de equipamentos de processo, Rio de Janeiro, Petrobrás, 2006.
- GAMMA FERRAMENTAS. **Manual de Instruções / Manutenção**. Disponível em: <<https://gammaferramentas.com.br/wp-content/uploads/2018/01/g2761-2761br-manual2018-site.pdf>> Acesso em 08/07/2020.
- HENN, E.A.L. **Máquinas de Fluido**. 2ª ed. Santa Maria, Editora UFSM, 2006.
- HOUGHTALEN, R.J.; HWANG, N.H.C.; AKAN, A.O. **Engenharia Hidráulica**. 4ª ed. São Paulo, Editora Pearson, 2012.
- KSB. **Manual de Treinamento. Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. 5ª ed., KSB, 2003.
- MACINTYRE, A.J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª ed. Rio de Janeiro, LTC Editora, 1997.
- MACINTYRE, A.J. **Equipamentos Industriais e de Processo**. Rio de Janeiro, LTC Editora, 2011.
- PFLEIDERER, C. **Bombas Centrífugas y Turbocompressores**. Barcelona, Editorial Labor, 1960.
- PROCEL. **Bombas: Guia Básico**. Eletrobrás [et al.]. Brasília: IEL/NC, 2009.
- ROBERTO, D.S.; SANTOS, F.S. **Estudo do Acionamento de Bombas Centrífugas por meio de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) em uma Unidade de Coqueamento Retardado**. 2014. Relatório de conclusão de curso de Bacharel em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET), Rio de Janeiro.
- SANTOS, S.L. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo, LCTE Editora. 2007.
- SULZER. **Axial Flow Pump type Ensival Moret CAHR**. Disponível em: <https://www.sulzer.com/brazil/-/media/files/products/pumps/axially-split-pumps/brochures/cahr_axial_flow_pump_e10549.ashx?la=en> Acesso em 19 de maio de 2020.

APÊNDICE A – LAYOUT E ITENS BANCADA DE TESTE DE BOMBAS

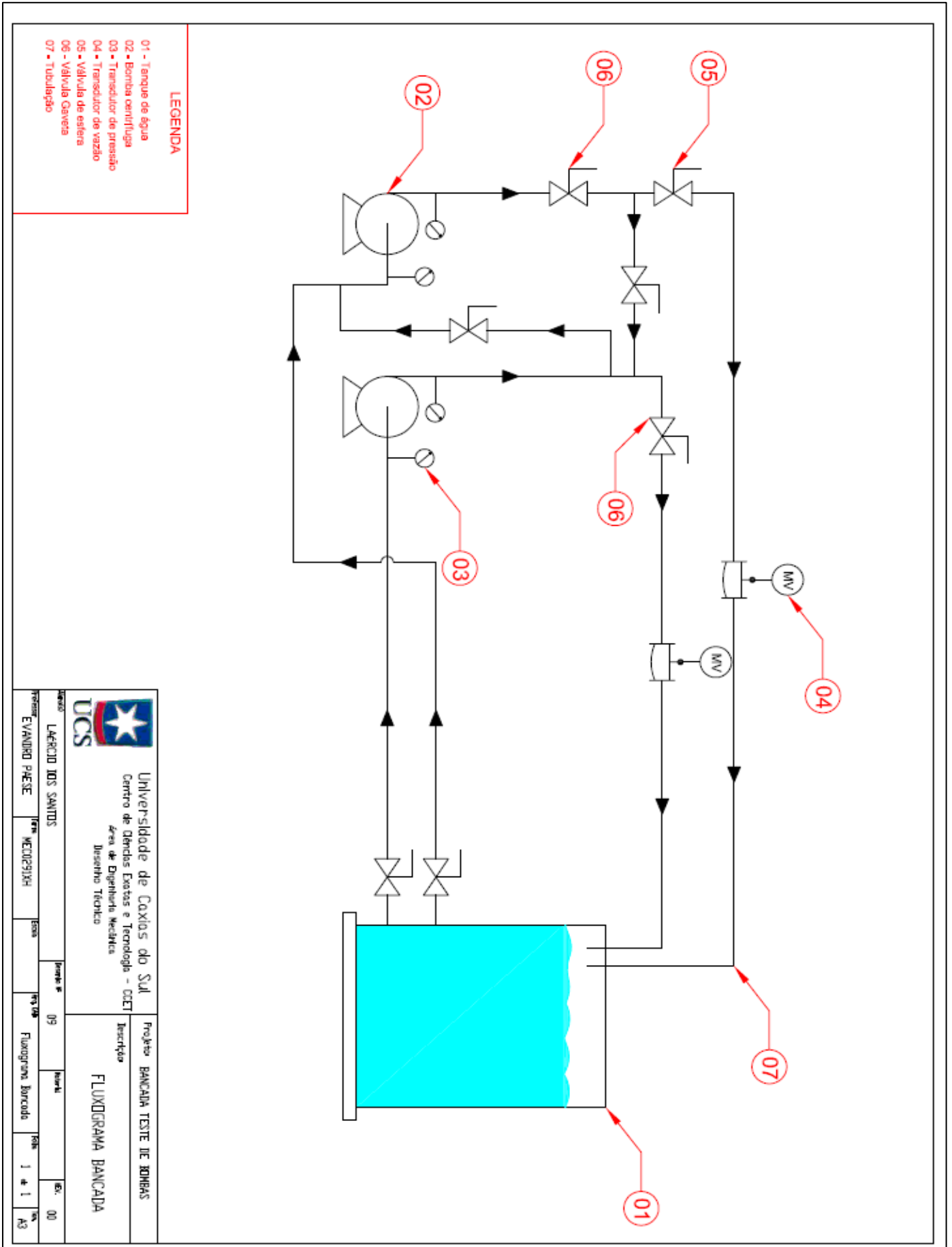


LISTA DE ITENS

Nº ITEM	NOME	MODELO
01	BOMBA 01	BOMBA GAVINHA Q880
02	BOMBA 02	BOMBA GAVINHA Q880
03	VALVULA 01	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
04	VALVULA 02	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
05	VALVULA 03	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
06	VALVULA 04	VALVULA GAVINHA BRONZE 1/8"
07	VALVULA 05	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
08	VALVULA 06	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
09	VALVULA 07	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
10	VALVULA 08	VALVULA ENFILEADA ALAO 1/8"
11	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	MEDIDOR FLUXO DE AGUA SIMOKIT TIPO URBINA 1,25 MPa, 2-100 l/min
12	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	MEDIDOR FLUXO DE AGUA SIMOKIT TIPO TUBERINA 1,25 MPa, 2-100 l/min 1"
13	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	TRANSDUTOR DE PRESSÃO MC1-0-10 bar 1/4"
14	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	TRANSDUTOR DE PRESSÃO MC1-0-10 bar 1/4"
15	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	TRANSDUTOR DE PRESSÃO MC1-0-10 bar 1/4"
16	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	TRANSDUTOR DE PRESSÃO MC1-0-10 bar 1/4"
17	TANQUE DE AGUA	TANQUE DE AGUA 375 LITROS
18	BASE TANQUE DE AGUA	TUBO PVC 1"
19	BASE BOMBAS	ACO CARBONO

<p>Universidade de Caxias do Sul Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET Área de Engenharia Mecânica Desenho Técnico</p>		<p>Projeto: BANCADA TESTE DE BOMBAS</p> <p>Descrição: BANCADA DE TESTES DE BOMBAS</p>	
<p>Aluno: LAÉRCIO DOS SANTOS</p> <p>Tutor: EVANDRO PAESE</p>	<p>Matrícula: MEC0291XH</p>	<p>Disciplina: 10</p>	<p>Layout Bancada</p>
		<p>1 de 1</p>	<p>A3</p>

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA BANCADA DE CURVAS DE BOMBAS

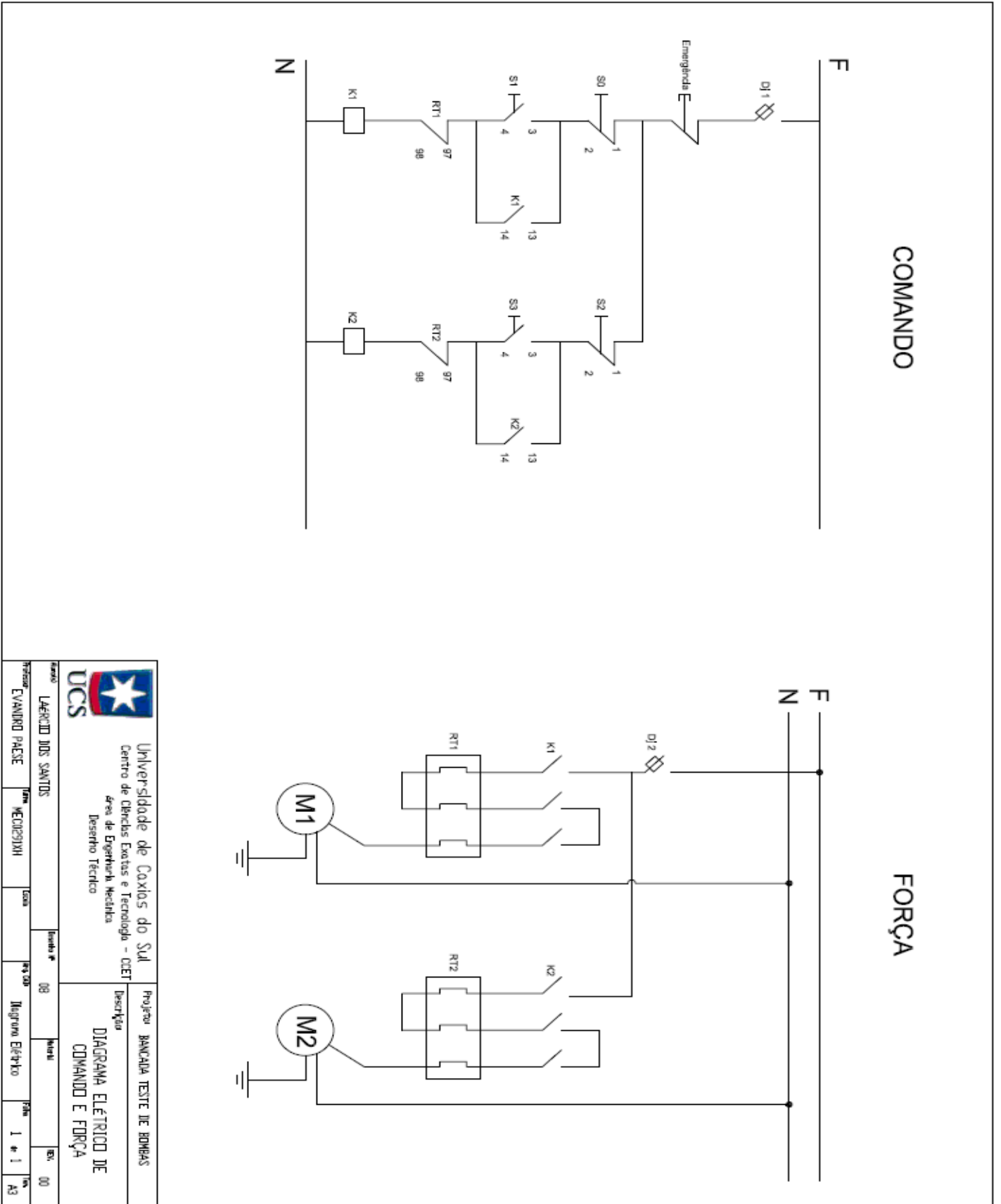



Universidade de Caxias do Sul
 Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - COET
 Área de Engenharia Mecânica
 Desenho Técnico

Projeto BANCADA TESTE DE BOMBAS
 Descrição
 FLUXOGRAMA BANCADA

Disciplina	LAERCIO DOS SANTOS	Período	09	Matrícula		Disc.	00
Professor	EVANDRO PIRESE	Disciplina	MEC0291XH	Essa		Fluxograma Bancada	Folha 1 de 1
							Ass.

APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO DE COMANDO E FORÇA




 Universidade de Caxias do Sul
 Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET
 Área de Engenharia Médica
 Desempenho Técnico

Projeto: BANCADA TESTE DE BOMBAS
 Descrição:
 DIAGRAMA ELÉTRICO DE
 COMANDO E FORÇA

Aluno	LAERCIO DOS SANTOS	Matrícula nº	09	Matrícula	00
Tutor	EVANDRO PAESE	Matrícula	MEC0291X1	Curso	
			Proj. 00	Proj. 00	
			Diagrama Elétrico	Folha	1 de 1
					43

APÊNDICE D – INSTRUÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DA BANCADA

TESTE BOMBA INDIVIDUAL

1. Fechar Válvulas 02, 05 e 06;
2. Abrir Válvulas 01, 03 e 08;
3. Ligar Bomba 01;
4. Inserir no programa do *Matlab* a porta analógica (linha 09 do programa) da placa de aquisição de dados onde está conectado o Transdutor de Pressão 02;
5. Coletar os dados lidos gerados no *Matlab* e copiar para uma planilha do *Excel*;
6. Aplicar a equação $P = 2,7909V^2 - 3,8472V - 3,359$ para transformar os dados coletados do Matlab em pressão em metros de coluna de água;
7. Inserir no programa do *Matlab* a porta analógica da placa de aquisição de dados aonde está conectado o Transdutor de Vazão 01;
8. Aplicar a equação $Q = 1,0439V^2 + 25,158V - 0,1808$ para transformar os dados coletados do Matlab em vazão em litros por minuto;
9. Realizar o fechamento gradativo da Válvula 03 e repetir os passos 4 ao 8 para cada posição escolhida da Válvula 03;

TESTE BOMBAS EM SÉRIE

1. Fechar Válvulas 02, 05, 06 e 08;
2. Abrir Válvulas 01, 03, 04, 05 e 07;
3. Ligar Bomba 01 e Bomba 02;
4. Inserir no programa do *Matlab* a porta analógica (linha 09 do programa) da placa de aquisição de dados onde está conectado o Transdutor de Pressão 04;
5. Coletar os dados lidos gerados no *Matlab* e copiar para uma planilha do *Excel*;
6. Aplicar a equação $P = 2,7909V^2 - 3,8472V - 3,359$ para transformar os dados coletados do Matlab em pressão em metros de coluna de água;
7. Inserir no programa do *Matlab* a porta analógica da placa de aquisição de dados aonde está conectado o Transdutor de Vazão 02;
8. Aplicar a equação $Q = 1,0439V^2 + 25,158V - 0,1808$ para transformar os dados coletados do Matlab em vazão em litros por minuto;

9. Realizar o fechamento gradativo da Válvula 04 e repetir os passos 4 ao 8 para cada posição escolhida da Válvula 04;

TESTE BOMBAS EM PARALELO

1. Fechar Válvulas 05 e 08;
2. Abrir Válvulas 01, 02, 03, 04, 06 e 07;
3. Ligar Bomba 01 e Bomba 02;
4. Inserir no programa do *Matlab* a porta analógica (linha 09 do programa) da placa de aquisição de dados onde está conectado o Transdutor de Pressão 04;
5. Coletar os dados lidos gerados no *Matlab* e copiar para uma planilha do *Excel*;
6. Aplicar a equação $P = 2,7909V^2 - 3,8472V - 3,359$ para transformar os dados coletados do Matlab em pressão em metros de coluna de água;
7. Inserir no programa do *Matlab* a porta analógica da placa de aquisição de dados aonde está conectado o Transdutor de Vazão 02;
8. Aplicar a equação $Q = 1,0439V^2 + 25,158V - 0,1808$ para transformar os dados coletados do Matlab em vazão em litros por minuto;
9. Realizar o fechamento gradativo das Válvulas 03 e 04 e repetir os passos 4 ao 8 para cada posição escolhida das Válvulas 03 e 04;

PROGRAMA MATLAB

```
%acquireData
clear all
global data
% global data_1
d = daq.getDevices
dev = d(2)
s = daq.createSession('mcc');
% s = daq('mcc');
addAnalogInputChannel(s, 'Board1', 'Ai7', 'Voltage'); %% Alterar canal (Ai7) para
mudar leitura de transdutor.
% ch1 = addinput(s, "Board0", 0, "Voltage");
```

```
% addAudioInputChannel(s, dev.ID, 1:2);
% s.IsContinuous = true
% s = daq.createSession('ni');
% s.addAnalogInputChannel('cDAQ1Mod1',0,'voltage')
s.Rate = 10
s.DurationInSeconds = 10
lh = s.addlistener('DataAvailable',@plotData1);
s.startBackground();
s.wait();
close(gcf);
figure (2)
plot(data); % plot global data

function plotData1(src,event)
persistent tempData;
global data
if(isempty(tempData))
tempData = [];
end
figure (1)
plot(event.TimeStamps, event.Data)
tempData = [tempData;event.Data];
data = tempData;
% data = [event.TimeStamps; event.Data];
end
```