

5 Montagem Experimental

Os dados sobre as características dinâmicas de uma válvula de alívio comercial foram levantados em uma bancada de ensaios especialmente construída para este fim. A montagem experimental foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e será descrita em detalhes no presente capítulo. Água foi o fluido de trabalho utilizado em todos os testes.

A Figura 5.1 apresenta o desenho esquemático que fornece uma visão geral da bancada construída. A Figura 5.2 apresenta uma fotografia do experimento montado.

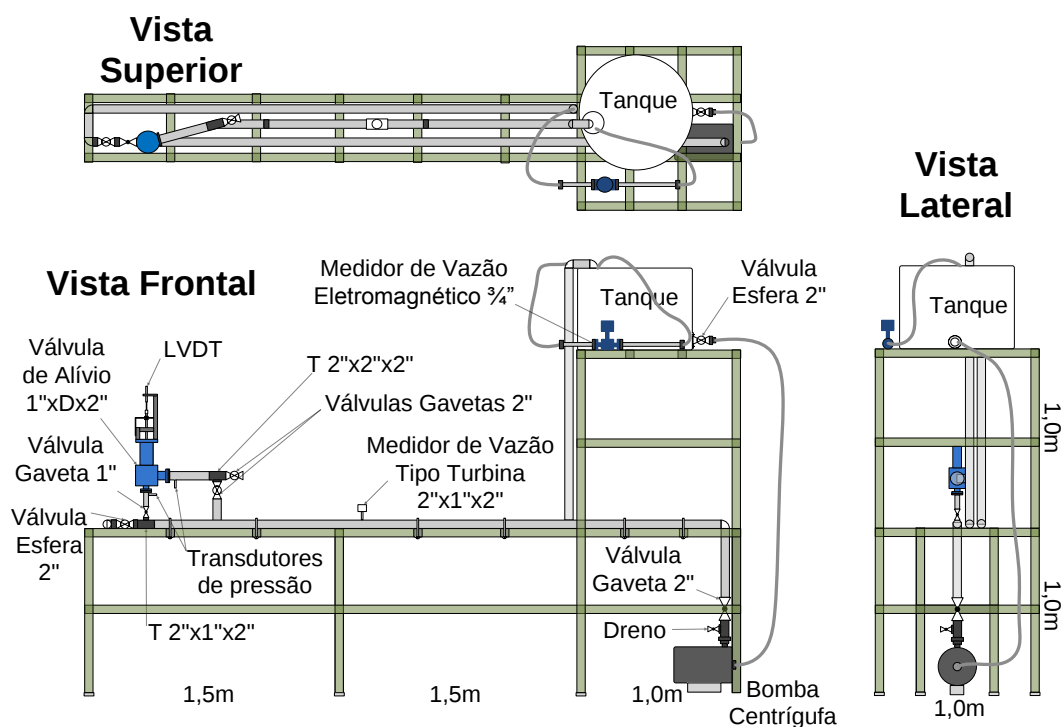


Figura 5.1 – Desenho da Montagem Experimental.



Figura 5.2 – Foto da Montagem Experimental.

Uma bomba centrífuga transporta água de um tanque pulmão, localizado a dois metros de altura, através de um circuito fechado com tubulação de aço galvanizado de duas polegadas de diâmetro nominal. Este circuito conta com uma válvula globo na descarga da bomba para controlar a vazão do circuito. Após a válvula, a tubulação percorre em um leito que fica a um metro do chão com aproximadamente quatro metros de comprimento. Em seguida, existe uma conexão “T” onde foi instalada a válvula de alívio a ser testada. A válvula testada era do tipo alívio de mola com fole. A válvula de alívio foi devidamente instrumentada, como será descrito mais adiante.

Logo após o “T”, na linha principal, foi instalada uma válvula de bloqueio do tipo esfera de duas polegadas. Esta válvula possuía a função de gerar os transientes hidráulicos no circuito de testes, forçando a abertura da válvula de alívio e permitindo assim a medição dos dados relativos às variações temporais das variáveis de interesse.

Após a válvula de bloqueio, o escoamento principal retornava ao tanque, passando antes por um medidor de vazão do tipo eletromagnético, o qual registrava a vazão dos testes no circuito principal.

Quando o escoamento principal era bloqueado e a válvula de alívio entrava em ação, a vazão aliviada pela válvula retornava ao tanque através de uma tubulação de retorno de aço galvanizado também de 2 polegadas de diâmetro nominal. Nesta tubulação de retorno foi instalado um medidor de vazão do tipo turbina para medir a vazão aliviada pela válvula.

Como será descrito em mais detalhes a seguir, a válvula de alívio testada foi instrumentada com sensores de deslocamento da haste da válvula e sensores de pressão de baixo tempo de resposta posicionados a montante e a jusante da válvula. Os sinais gerados pelos instrumentos foram simultaneamente registrados por um sistema de aquisição de dados com capacidade para altas taxas de medição.

5.1.

Bomba do Circuito Fechado

Foi selecionada uma bomba centrífuga DANCOR, da série CAM, modelo CAM-W6C para movimentar a água na seção de testes. A Figura 5.3 apresenta as curvas características de altura manométrica (*head*) e potência da bomba selecionada.

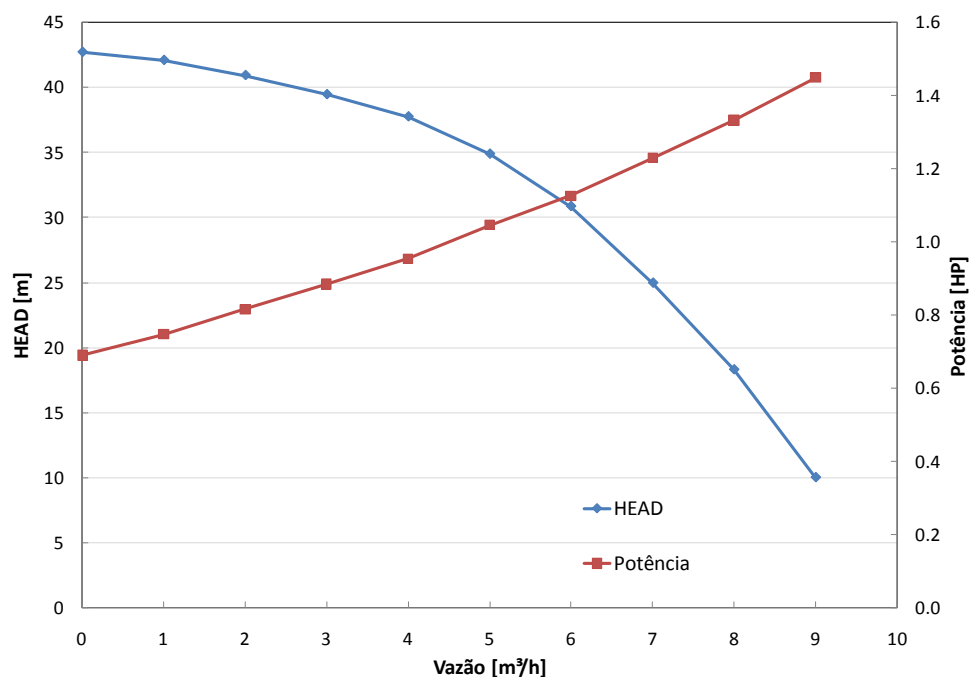


Figura 5.3 – Curvas características da bomba DANCOR modelo CAM-W6C utilizada nos ensaios.

A bomba possui um rotor com 145 mm de diâmetro com uma altura manométrica total de 43 m. Isto proporciona uma pressão de descarga manométrica de aproximadamente 4 kgf/cm² com água. Esta pressão é suficiente para manter aberta a válvula de alívio do circuito que apresenta pressão manométrica de ajuste de 2 kgf/cm² e vazão de projeto de 3,78m³/h.

O motor elétrico trifásico de 2 polos da WEG acoplado à bomba, possui as características apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Características do Motor da Bomba.

Característica	Valor	Unidade
Carcaça	NEMA 56	-
Eixo de aço carbono	5/8	pol
Rotação	3450	RPM
Frequência	60	Hz
Voltagem	220	Volts
Potência	1,5	HP

A Figura 5.4 apresenta a bomba instalada no circuito fechado.



Figura 5.4 – Fotografia da bomba DANCOR, modelo CAM-W6C, utilizada nos ensaios.

Para conectar a sucção da bomba ao tanque, foi utilizada uma mangueira trançada flexível de uma polegada de diâmetro. Na descarga da bomba, foi instalada uma conexão de expansão, de uma para duas polegadas, e uma união para facilitar o desmonte e manutenção.

Informações mais detalhadas sobre a bomba podem ser encontradas em sua folha de dados no Anexo 9.1.

5.2. Dreno e Controle de Vazão do Circuito Fechado

A jusante da união conectada na descarga da bomba foi instalada uma conexão “T” com uma válvula de bloqueio do tipo esfera para funcionar como dreno do circuito caso fosse necessário realizar a troca do fluido ou a manutenção do sistema.

A Figura 5.5 mostra a instalação dos acessórios na descarga da bomba.



Figura 5.5 – Acessórios na descarga da bomba.

A vazão de água no circuito fechado era controlada através do estrangulamento da descarga da bomba por uma válvula gaveta de duas polegadas e pelo controle da rotação da bomba através de um inversor de frequência. A Figura 5.5 mostra a válvula instalada a jusante da bomba com um volante amarelo, enquanto a Figura 5.6 mostra o inversor de frequência WEG utilizado para controlar a rotação da bomba.



Figura 5.6 – Inversor de frequência utilizado no controle da rotação da bomba.

O controle de vazão no circuito foi realizado em parte pela válvula de bloqueio na descarga da bomba e em parte pelo controle da rotação da bomba. A válvula foi ajustada manualmente restringindo o escoamento de modo a colocar o circuito em regime permanente com o valor de vazão desejado para a realização do estudo do comportamento dinâmico da válvula de alívio. O inversor de frequência foi utilizado para mudar a rotação da bomba, e por consequência a curva da bomba, proporcionando um ponto de operação adequado para alcançar a vazão de alívio desejada após o bloqueio do circuito sem gerar cavitação. A cavitação foi evitada, pois a sua presença dificultaria a observação dos fenômenos transientes.

5.3. Medidor de Vazão do Circuito Fechado

Foi utilizado um medidor de vazão eletromagnético da INCONTROL, modelo VML 019 e número de série 0031077, para medir a vazão do circuito fechado antes de gerar o transiente para estudo. Este estava localizado na tubulação de retorno para o tanque.

A leitura da vazão foi realizada por um computador de vazão da INCONTROL, modelo CEV 1000. Seu sinal de saída de 4 a 20 mA foi lido pelo sistema de aquisição de dados. A Tabela 5.2 apresenta as características do medidor de vazão do circuito fechado.

Tabela 5.2 – Características do Medidor de Vazão do Circuito Fechado.

Característica	Valor	Unidade
Diâmetro nominal	3/4	polegada
Faixa de medição	0,31 a 10,2	m ³ /h
Frequência de medição	1	Hz

A Figura 5.7 apresenta uma fotografia do medidor eletromagnético e o computador de vazão da INCONTROL utilizados para medir a vazão no circuito fechado.



Figura 5.7 – Medidor de Vazão do Circuito Fechado.

O certificado de calibração do medidor fornecido pelo fabricante estava expirado e, por esta razão, não foi referenciado no presente trabalho. Porém, este medidor foi colocado em série com o medidor de vazão do tipo turbina, utilizado para medir a vazão na descarga da válvula de alívio, de modo a permitir o levantamento de sua curva de calibração. O medidor turbina possui certificado de calibração válido. A Figura 5.8 exibe a curva de calibração utilizada no sistema de aquisição de dados para o medidor eletromagnético de vazão.

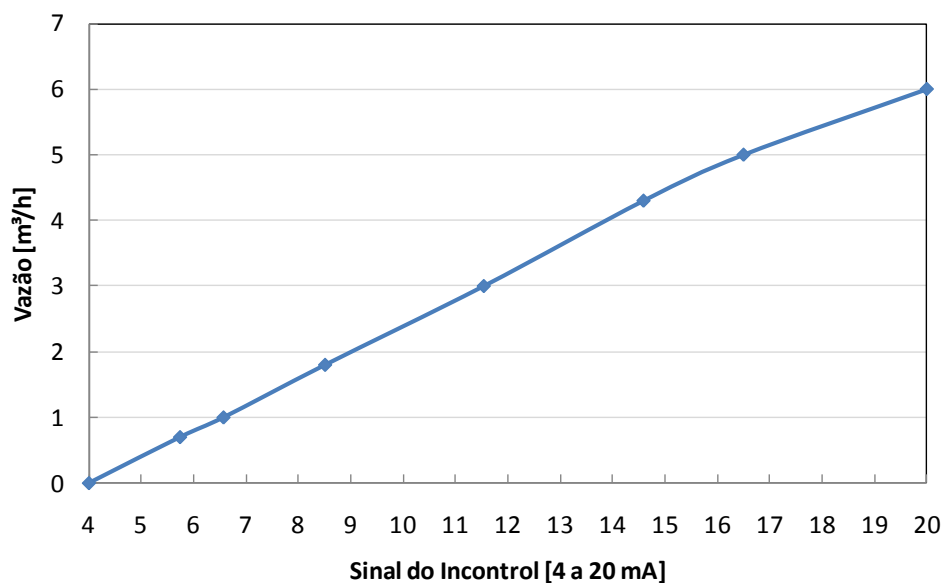


Figura 5.8 – Curva de calibração do medidor de vazão marca INCONTROL, modelo VML 019 utilizado na medição de vazão do circuito fechado.

O medidor eletromagnético foi instalado com uniões a montante e a jusante para facilitar sua desmontagem para manutenção e limpeza. O seu aterramento foi realizado conforme as orientações no manual de instalação do fabricante, Figura 5.9.

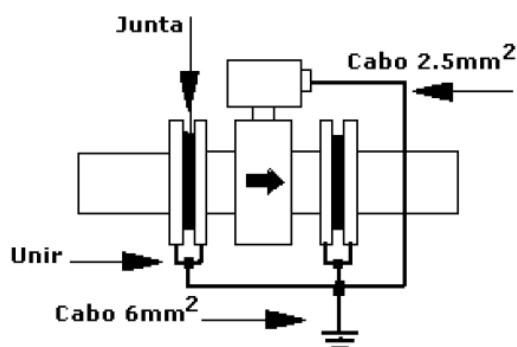


Figura 5.9 – Aterramento do medidor de vazão eletromagnético (Fonte: manual da Incontrol).

5.4. Válvula de Alívio

Após a bomba a seção de testes possui um trecho reto com aproximadamente quatro metros de comprimento e 2 polegadas de diâmetro nominal até uma conexão “T” de 2”x1,5”x2”. Na saída de 1,5” do “T” foi montada uma válvula de bloqueio de esfera de 1,5” de diâmetro com uma redução de 1,5” para 1”. Após esta redução existia uma trecho reto na vertical formado de tubo com 1” de diâmetro nominal, o qual possui um flange de 1” e classe 150# que realiza a conexão com a entrada da válvula de alívio. Neste tubo de 1” existe uma tomada de pressão para onde foi instalado um sensor de pressão. A Figura 5.10 apresenta a válvula de alívio, pintada de azul, instala no circuito.



Figura 5.10 – Válvula de alívio montada no circuito de testes.

A válvula de alívio foi dimensionada pelos procedimentos da norma API 520 do American Petroleum Institute. Através dela foi calculado o orifício necessário para aliviar 3,7 m³/h com uma pressão de ajuste de 2 kgf/cm² e contrapressão de 0,2 kgf/cm². A memória de cálculo do dimensionamento da

válvula de alívio encontra-se no Anexo 9.2 e resultou em uma área necessária do orifício de 64,516 mm² (0,100 pol²).

Fazendo o uso da norma API 526, foi escolhido o orifício padronizado imediatamente acima com 70,9676 mm² (0,110 pol²) denominado de orifício “D” e os flanges de conexão à linha de testes de 1” e classe 150# a montante e 2” e classe de 150# a jusante. O Anexo 9.3 apresenta a folha de dados da válvula de alívio com todos os certificados fornecidos pelo fabricante Crosby após a fabricação do dispositivo.

Na descarga da válvula, existe um trecho de tubo reto horizontal de duas polegadas de diâmetro nominal no qual existe uma tomada de pressão para o onde foi instalado um sensor de pressão. Após este trecho existe uma conexão “T” de 2” onde a linha de alívio retorna para o leito do circuito onde há um medidor de vazão tipo turbina.

5.5.

Medidor de Vazão da Descarga da Válvula de Alívio

Como o propósito do estudo é verificar o comportamento dinâmico da válvula de alívio, torna-se necessário medir a vazão transiente na descarga da válvula de alívio.

Foi realizada pesquisa junto a alguns fabricantes de medidores de vazão na qual se concluiu que dentre os medidores disponíveis no mercado, os do tipo turbina possuem a melhor resposta para medir vazão transiente.

Este instrumento é constituído de equalizadores de fluxo na entrada e na saída e um rotor entre eles com um ímã na ponta de cada pá do rotor. Quando há fluxo através dele, o rotor gira e um sensor, conhecido como *pick-up*, conta os pulsos magnéticos emitidos pela passagem das pás do rotor. A Figura 5.11 apresenta uma vista explodida do instrumento.

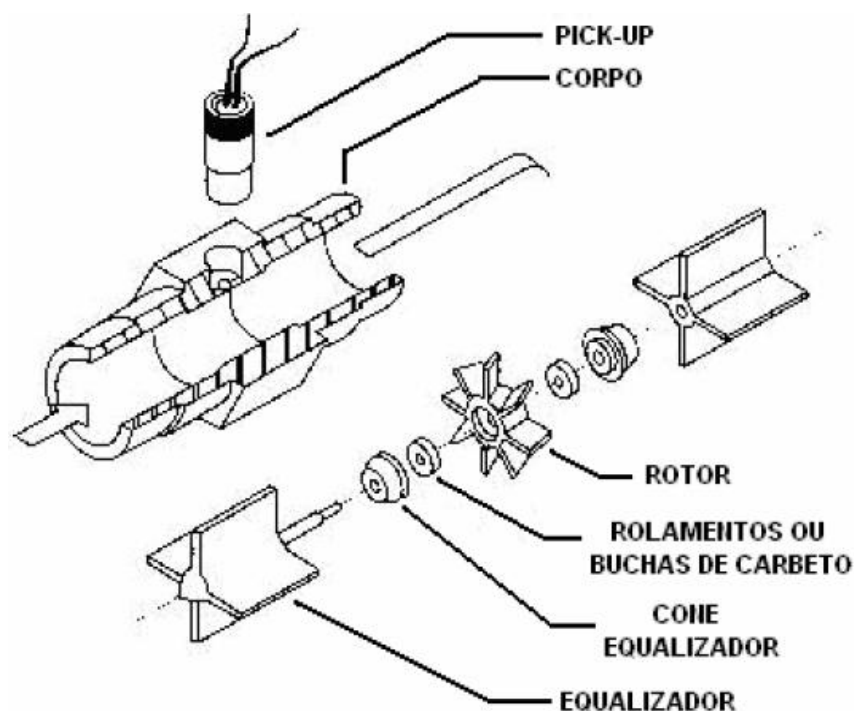


Figura 5.11 – Vista explodida do medidor de vazão tipo turbina (fonte: catálogo da Contech).

Para medir a vazão na descarga da válvula de alívio foi adquirido um medidor da Contech, série SVT-L, modelo L19. A Tabela 5.3 apresenta as principais características deste medidor.

Tabela 5.3 – Características do Medidor de Vazão da Descarga da Válvula de Alívio.

Característica	Valor	Unidade
Diâmetro Nominal	3/4	polegada
Conexão ao Processo	2	polegadas
Faixa de Medição	0,67 a 6,8	m ³ /h
Material	Aço Inox 304	-
Eletrônica	Amplificador de Pulsos	-
Classe de temperatura	80	°C
Pressão de trabalho	18	bar
Frequência para 6,8m ³ /h	168	Hz

O Anexo 9.4 traz a folha de dados do medidor de vazão com suas características. O Anexo 9.5 apresenta o certificado de calibração do medidor de vazão adquirido e o *data book* com os certificados do fabricante e de seus padrões. A Figura 5.12 apresenta uma fotografia do medidor de vazão tipo turbina da Contech instalado na linha de descarga da válvula de alívio.



Figura 5.12 – Medidor de vazão tipo turbina Contech, série SVT-L, modelo L19 utilizado nos ensaios para medir a vazão de alívio da válvula.

Os medidores de vazão necessitam de um trecho reto tanto a montante como a jusante da localização do medidor na tubulação de processo, para que o escoamento apresente perfil de velocidade desenvolvido com padrão semelhante àquele utilizado nas condições de calibração do instrumento.. O valor típico do trecho reto recomendado é de dez vezes o diâmetro da tubulação a montante e de cinco vezes o diâmetro da tubulação a jusante, conforme ilustrado na Figura 5.13.

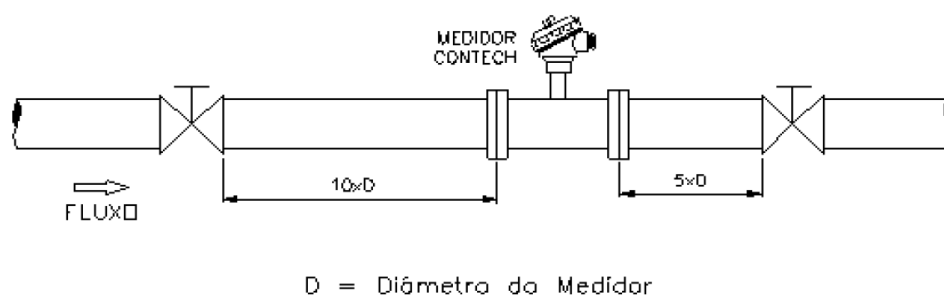


Figura 5.13 – Instalação do medidor de vazão tipo turbina (Fonte: Manual da Contech).

A placa eletrônica localizada em cima do rotor é responsável pela adequação do sinal proveniente do sensor magnético (*pick-up*) às condições de entrada do elemento eletrônico ao qual será conectado, como o Indicador e totalizador remoto (CTH-2265) e o aquisitor de dados (HBM).

A placa é alimentada com uma tensão de 5 VDC, o amplificador recebe um sinal da ordem de 100mVac proveniente do sensor magnético, processa o mesmo tornando-o uma onda quadrada de frequência proporcional à passagem das pás do rotor e amplitude de acordo com a alimentação.

Além de condicionar o sinal, a placa amplificadora tem por função filtrar ruídos eletromagnéticos que possam existir na área onde está instalado o medidor. A Figura 5.14 apresenta a placa amplificadora do medidor.

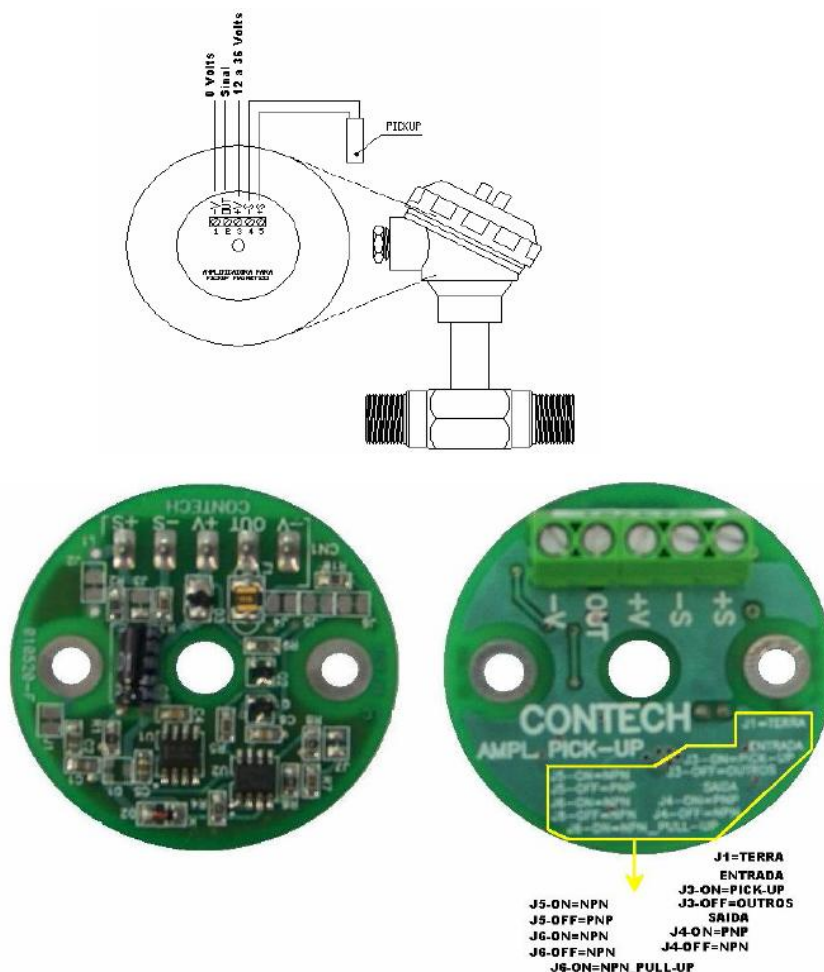


Figura 5.14 – Placa Amplificadora do medidor de vazão tipo turbina (Fonte: Manual da Contech).

A frequência da onda quadrada que sai da placa amplificadora era lida pelo indicador e totalizador CTH-2265 e pelo sistema de aquisição de dados. O CTH possui um visor digital que indica a vazão atual em m^3/h e possui recursos para totalizar o volume movimentado através dele. A Figura 5.15 apresenta o equipamento instalado dentro de uma caixa de PVC com suas placas de identificação.



Figura 5.15 – Indicador e totalizador do medidor de vazão tipo turbina
(Fonte: Manual da Contech).

5.6. Instrumentação do Circuito Fechado

Para adquirir os dados de processo foi utilizado um sistema de aquisição de dados da HBM, série QUANTUMX, modelo MX-840. Trata-se de um aparelho de condicionamento e aquisição de dados, com 8 canais multifuncionais, oferecendo um conversor analógico/digital de 24 bits por canal, taxa de amostragem de até 19200Hz por canal, filtros de 0,01Hz a 3,2KHz, com alimentação para transdutores de 5 a 24Vdc, interface *Ethernet* e *Firewire*.

O Anexo 9.6 traz a folha de dados do equipamento com todos os detalhes e características do mesmo. A Figura 5.16 apresenta o sistema de aquisição de dados instalado com os canais ocupados pelos transdutores.

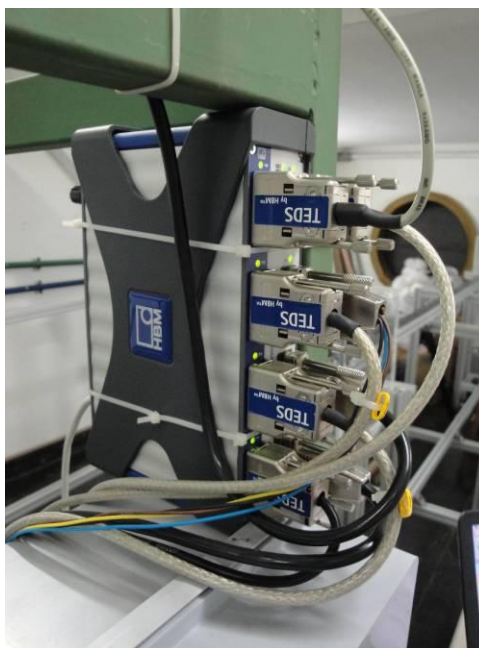
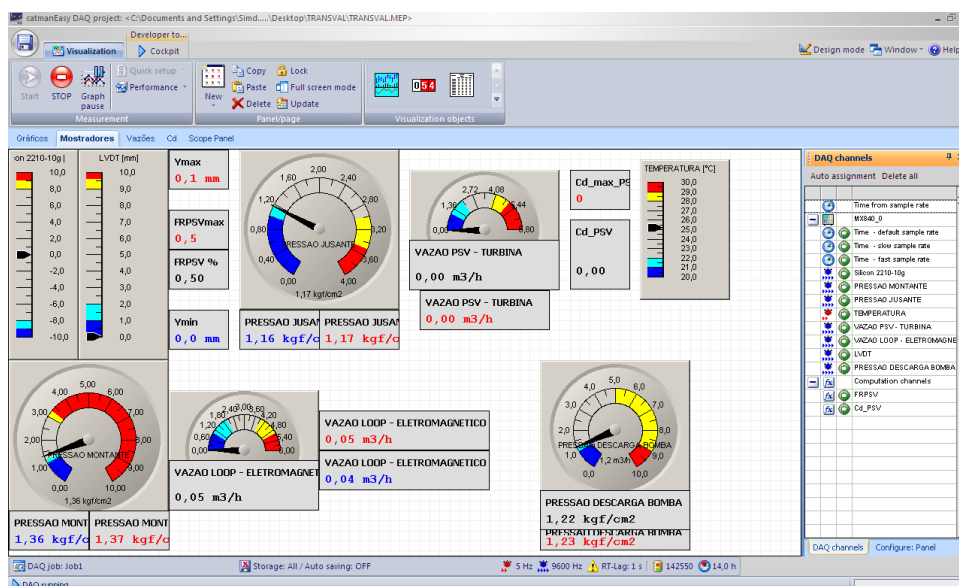


Figura 5.16 – Fotografia do sistema de aquisição de dados HBM QUANTUMX MX-840 utilizado nos ensaios.

O sistema de aquisição de dados é gerenciado por uma programa denominado CatmanAP que realiza as tarefas de visualização, registro, análise em tempo real e pós-processamento dos dados adquiridos. A Figura 5.17 apresenta algumas telas construídas para monitoramento das variáveis de interesse medidas ao longo dos experimentos.



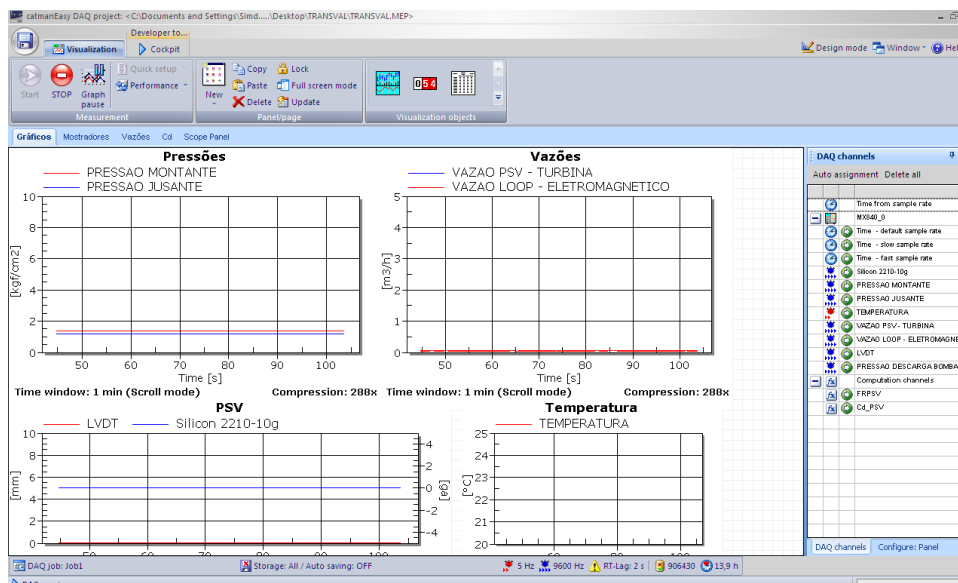


Figura 5.17 – Exemplos de telas de monitoramento das variáveis medidas ao longo dos experimentos.

5.6.1. Transdutores de Pressão

Os transdutores de pressão absoluta localizados a montante e a jusante da válvula de alívio são do mesmo fabricante do sistema de aquisição de dados, HBM. Os sensores selecionados para os experimentos foram dos modelos K-P8AP-218-17-A5-00-0-K que possuem as características indicadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Características dos transdutores de pressão.

Faixa nominal	10bar
Classe de precisão	0.3%,
Sensibilidade	2mV/V
Grau de proteção	IP67
Conexão mecânica	NPT1/4
Conexão elétrica	cabo fixo com 5m

A Figura 5.18 apresenta uma foto dos transdutores instalados a montante e a jusante da válvula de alívio.



Figura 5.18 – Transdutores de pressão instalados a montante e jusante da válvula de alívio.

O Anexo 9.7 traz a folha de dados dos transdutores de pressão com informações detalhadas.

5.6.2. Transdutor Linear de Deslocamento – LVDT

O transdutor linear de deslocamento foi instalado na haste da válvula de alívio com o objetivo de registrar a posição instantânea do disco em relação ao assento, uma vez que na válvula de alívio estudada, a haste estava conectada diretamente ao disco.

Foi selecionado o LVDT da Measurement Specialties, modelo MHR 500, que possui as características relacionadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Característica do transdutor linear de deslocamento utilizado.

Faixa nominal	$\pm 12,5$ mm
Linearidade (50% da faixa)	0,15
Sensibilidade	1,96 mV/V
Impedância	Primária: 264 Ω Secundária: 810 Ω
Frequência	10 kHz

O *range* nominal do transdutor selecionado cobre com folga o deslocamento máximo do disco que é de 9,6mm para a válvula de alívio selecionada para este estudo. A Figura 5.19 apresenta o transdutor instalado no castelo da válvula de alívio.

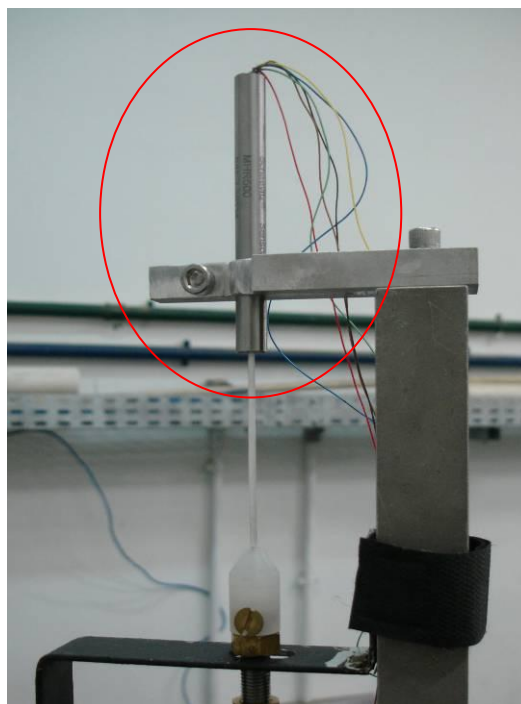


Figura 5.19 – Transdutores linear de deslocamento conectado à haste da válvula de alívio.

Foi necessário fabricar um suporte para centrar o corpo do LVDT à haste da válvula e um adaptador em PVC para fixar o núcleo na ponta da haste e introduzi-lo no interior do corpo do LVDT.

O Anexo 9.8 traz a folha de dados do transdutor. O processo de calibração do transdutor que resultou no certificado de calibração apresentado no Anexo 9.9, foi realizado para uma alimentação de 3V. Como o sistema de aquisição de dados utilizado só é capaz de fornecer tensão de excitação de 5V, o transdutor teve que ser recalibrado utilizando para isso um micrômetro Mitutoyo de 5 a 25mm, número 79151, do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da PUC-Rio. A Figura 5.20 apresenta a curva de calibração produzida com o auxílio do micrômetro.

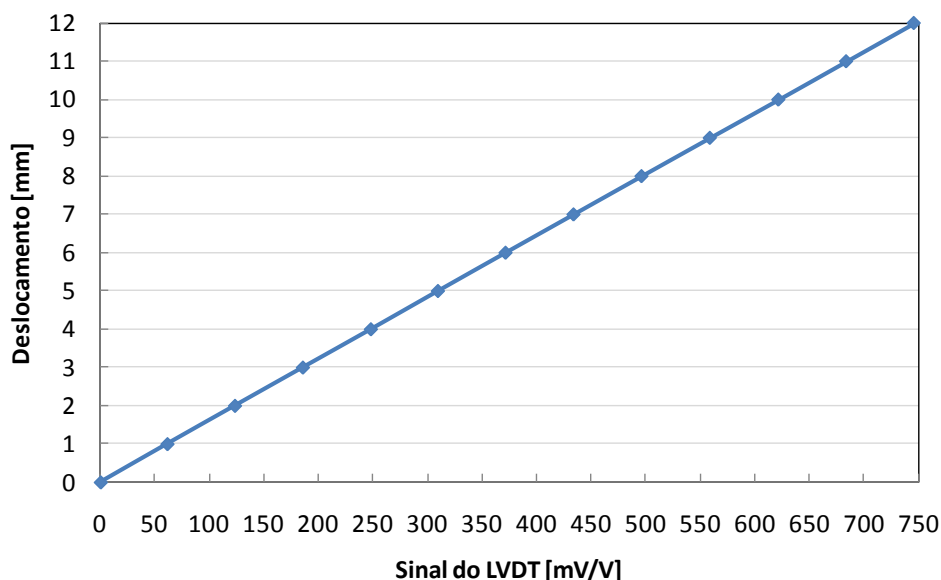


Figura 5.20 – Curva de calibração do LVDT utilizada nos ensaios.

5.6.3. Transdutor de Temperatura – PT100

Para o monitoramento da temperatura da água, foi instalado um transdutor de temperatura PT100 da HBM no retorno do tanque pulmão. Este oferece ligação à quatro fios, e é montado e haste em inox com 3mm de diâmetro externo e 100mm de comprimento. Possui cabo de ligação com o sistema de aquisição de dados da HBM com 3 metros de comprimento e isolado em PVC.

A Figura 5.21 ilustra o sensor de temperatura PT100 instalado na linha de retorno do tanque.



Figura 5.21 – Sensor de temperatura da água do tipo PT100 instalado na linha de retorno da seção de testes.

5.6.4. Acelerômetro

Com a intenção de verificar a velocidade com que o disco se movimenta, foi adquirido um acelerômetro capacitivo uniaxial da HBM, modelo 2210-010. Este dispositivo possui um corpo hermeticamente selado e tem a função de medir a aceleração no tempo. A Tabela 5.6 relaciona as características técnicas do dispositivo adquirido.

Tabela 5.6 – Característica do acelerômetro.

Faixa nominal	$\pm 10 \text{ g}$
Resposta à aceleração	Ascendente e descendente
Resposta em frequência (-3 dB)	0 - 600Hz
Sensibilidade	400 mV/g
Saída	0,5V a 4,5V

Temperatura de Operação	-40 a +85°C
Alimentação	+9 a +32 Vdc
Conexão	4 fios
Comprimento do cabo	1,0 m
Material	Alumínio anodizado de alta resistência
Choque mecânico máximo (0,1 ms)	2000 g

A Figura 5.22 apresenta o acelerômetro instalado na haste da válvula de alívio através de um suporte fabricado em alumínio. Este foi instalado na haste, pois a haste está ligada diretamente ao disco.

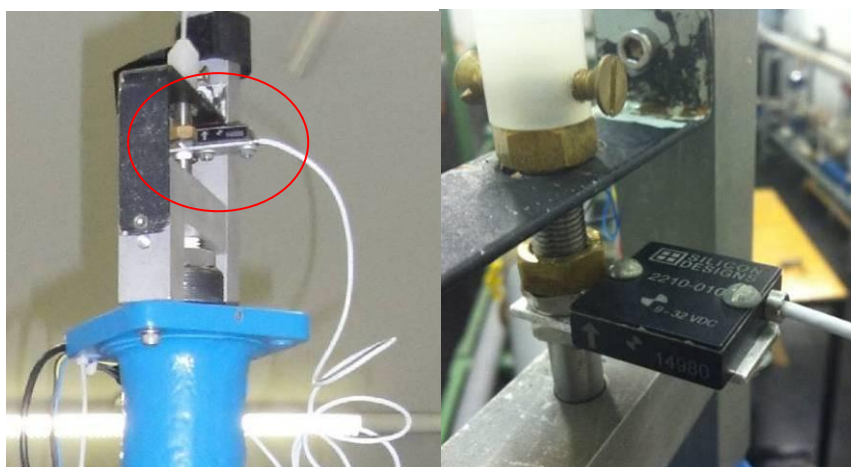


Figura 5.22 – Acelerômetro instalado solidário à haste da válvula de alívio para medir sua aceleração.

5.7. Válvula de Bloqueio Motorizada

Para realizar o bloqueio do circuito e produzir o transiente de pressão necessário para forçar a abertura da válvula de alívio, foi instalada uma válvula de bloqueio a jusante da derivação da válvula de alívio. Trata-se de uma válvula

de esfera de 2 polegadas com passagem reduzida de $\frac{1}{4}$ de volta da MIPEL. Mais informações sobre esta válvula podem ser encontradas no catálogo do fabricante, Anexo 9.10.



Figura 5.23 – Válvula de bloqueio utilizada para produzir os transientes hidráulicos na seção de testes.

Com a intenção de padronizar o processo de fechamento da válvula e permitir a sua realização com diferentes velocidades, a alavanca de comando da válvula foi substituída por um carretel onde foi enrolado um cabo flexível. Para realizar o fechamento este cabo era recolhido com velocidade constante por meio de um motor elétrico com controle de rotação oferecido por um inversor de frequência. Na ponta do eixo do motor elétrico foi adaptada uma polia com diâmetro conhecido, sobre a qual o cabo flexível era enrolado de maneira frouxa. A operação de fechamento da válvula a uma dada velocidade era iniciada pelo ajuste da rotação do motor no variador de frequência para um valor pré-calculado que iria oferecer uma velocidade periférica da polia adequada para a velocidade do cabo desejada. Como o cabo estava enrolado de maneira frouxa sobre a polia, não havia tração e nenhum esforço era transmitido para o cabo para fechar a válvula. Aplicando-se uma pequena força na ponta do cabo, este era ajustado sobre a polia que o tracionava na velocidade previamente ajustada, fechando a válvula no tempo desejado.



Figura 5.24 – Sistema de fechamento da válvula de bloqueio.

5.8. Procedimento experimental

Após a apresentação da bancada experimental construída, esta seção descreve o procedimento experimental realizado para a aquisição dos dados sobre o comportamento dinâmico da válvula de alívio ensaiada.

Os experimentos eram iniciados com a energização de todos os equipamentos uma hora antes da elaboração dos testes, conforme recomendação do fabricante do medidor de vazão eletromagnético instalado no circuito fechado. Este procedimento garantia um melhor ajuste do zero do medidor.

Após uma hora com todos os equipamentos ligados, o programa de aquisição de dados CatmanEasy AP era inicializado. Todos os transdutores eram inicializados pelo programa que carrega automaticamente as calibrações de cada transdutor previamente configuradas com os dados fornecidos pelos fabricantes. Era realizado o ajuste do zero do medidor de vazão eletromagnético e do transdutor linear de posição utilizado o programa de aquisição de dados.

Após estes procedimentos iniciais, realizavam-se os testes propriamente ditos. Antes dos testes voltados para a determinação do comportamento dinâmico da válvula de alívio, foram realizados testes auxiliares para a determinação do comportamento dos coeficientes de descarga das válvulas de alívio de bloqueio.