

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** **Centro Tecnológico**  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# **Projeto de um Aparato Experimental Portátil para Medição de Vazão em Tubos Capilares**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação da disciplina:*

***DAS 5501: Estágio em Controle e Automação Industrial***

***Gabriel de Souza Gonçalves***

*Florianópolis, Julho de 2012*

# **Projeto de um Aparato Experimental Portátil para Medição de Vazão em Tubos Capilares**

***Gabriel de Souza Gonçalves***

**Orientadores:**

***Marco Aurélio Schmitz, Especialista de Laboratório***

---

Assinatura do Orientador

***Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.***

---

Assinatura do Orientador

Este relatório foi julgado no contexto da disciplina  
**DAS 5501: Estágio em Controle e Automação Industrial**  
e aprovado na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**



# ***Resumo***

O presente trabalho apresenta o projeto de uma aparato experimental portátil para a medição de vazão em tubos capilares a ser utilizado no Laboratório de Aplicação da Whirlpool S.A. - Unidade Embraco de Compressores e Soluções de Refrigeração (Embraco). O Laboratório Aplicação é responsável por testar os produtos Embraco aplicados a sistemas de refrigeração, bem como adequar produtos de clientes para que possam ser utilizados com os compressores da empresa. Nesse processo de adaptação de sistemas é de grande importância que seja medida a vazão em tubos capilares. O projeto foi baseado na norma ASHRAE 28 e propôs a utilização do medidor de vazão mássica CMFS010 da fabricante Micro Motion como elemento principal do novo aparato experimental, além da uso da válvula Swagelok KPR como elemento regulador de pressão. Para prever o desempenho do aparato projetado foram realizadas algumas alterações na bancada atualmente utilizada para medir vazão em tubos capilares. Por meio de um software desenvolvido em Labview e o padrão Modbus/RS-485 foi possível fazer a comunicação com os transmissores utilizados e fazer a aquisição das variáveis do processo. Os resultados dos ensaios realizados mostraram que utilizando-se medidores de vazão mássica é possível fazer as medições em um período de tempo até 8 vezes menor que o levado pelo aparato de medição utilizado atualmente. Também se constatou que o novo aparato será mais portátil, sustentável e com menor erro de medição, características conferidas por este utilizar essencialmente componentes eletrônicos na sua composição.



# ***Abstract***

This work presents the design of a portable experimental rig for measuring capillary tubes flow to be used at the Application Lab of Whirlpool S.A. - Embraco Compressor and Cooling Solutions Unit. The Application Lab is responsible for testing Embraco products applied to cooling systems as well as for adequating client products so that the compressors manufactured by Embraco can be used. The stand design was based on ASHRAE 28 standard and used the coriolis mass flow meter Micro Motion CMFS010 as its main component and the Swagelok KPR Series valve as pressure regulator element. To predict the performance of the designed stand some changes in the actual experimental rig were made. A Labview program was developed to communicate with the transmitters in use and to make the acquisition of the process variable data. Experiments carried out showed that using a mass flow meter it is possible to run the tests up to 8 times faster. Also, it was noticed that the new experimental rig will be more portable, sustainable, and will present better accuracy. These characteristics are provided by the electronic devices that will be used to build the new test stand.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>15</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>17</b>
1.1 Contextualização . . . . .	17
1.2 Sistema de Refrigeração . . . . .	18
1.2.1 Tubo Capilar . . . . .	20
1.3 Objetivos . . . . .	22
1.4 Justificativas . . . . .	23
1.5 Estrutura do Documento . . . . .	25
<b>2 Embraco</b>	<b>27</b>
2.1 Laboratório Aplicação . . . . .	28
<b>3 Sistemas de Medição</b>	<b>31</b>
3.1 Instrumentos de Medição . . . . .	31
3.1.1 Indicador . . . . .	32
3.1.2 Transmissor . . . . .	32
3.1.2.1 Transmissor Inteligente ( <i>Smart Transmitter</i> ) . . . . .	32
3.1.3 Transdutor . . . . .	33
3.2 Medição de Vazão . . . . .	33
3.2.1 Conceito de Vazão . . . . .	33

3.2.2	Vazão em Tubulação . . . . .	34
3.2.3	Vazão Volumétrica ou Mássica . . . . .	34
3.3	Medidor tipo Coriolis . . . . .	35
3.3.1	Efeito Coriolis . . . . .	36
3.3.2	Medidor Industrial . . . . .	37
3.4	Medição de Vazão em Tubos Capilares . . . . .	38
3.5	Regulador de Pressão . . . . .	38
3.6	Aparato Experimental Base . . . . .	39
3.7	Considerações Finais . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Especificação dos Componentes Principais</b>	<b>43</b>
4.1	Medidor de Vazão Mássica . . . . .	43
4.1.1	Medidor de Vazão Mássica Siemens . . . . .	44
4.1.1.1	Incerteza de Medição . . . . .	44
4.1.1.2	Efeitos do Ambiente . . . . .	45
4.1.2	Medidor de Vazão Mássica Micro Motion . . . . .	45
4.1.2.1	Incerteza de Medição . . . . .	45
4.1.2.2	Efeitos do Ambiente . . . . .	46
4.1.3	Faixas de Medição . . . . .	47
4.1.4	Análise Teórica dos Medidores . . . . .	50
4.1.5	Análise Prática dos Medidores . . . . .	50
4.1.5.1	Escolha dos Capilares . . . . .	52
4.1.5.2	Testes Comparativos . . . . .	53
4.1.6	Escolha do Medidor . . . . .	56
4.2	Regulador de Pressão . . . . .	56
4.2.1	Cálculo do $C_v$ . . . . .	57
4.2.2	Escolha do Regulador de Pressão . . . . .	60

4.2.3	Considerações Finais . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Projeto</b>	<b>67</b>
5.1	Introdução . . . . .	67
5.2	Versões do Projeto . . . . .	68
5.2.1	Versão de Desenvolvimento . . . . .	69
5.2.1.1	Equipamentos . . . . .	69
5.2.1.2	Interface com o Usuário . . . . .	70
5.2.2	Versão Final . . . . .	71
5.2.2.1	Equipamentos . . . . .	72
5.2.2.2	Modelo 3D . . . . .	74
5.2.2.3	Interface com o Usuário . . . . .	75
5.3	Considerações Finais . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Implementação</b>	<b>79</b>
6.1	Versão de Desenvolvimento . . . . .	79
6.1.1	Comunicação Modbus/RS-485 . . . . .	80
6.1.2	Software Labview . . . . .	83
6.1.3	Detalhamento do Programa . . . . .	83
6.2	Versão Final . . . . .	86
6.3	Considerações Finais . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>89</b>
7.1	Testes . . . . .	89
7.2	Novo aparato x Aparato atual . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>99</b>
	<b>Referências</b>	<b>101</b>



# ***Lista de Figuras***

1.1	Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor. Adaptado de Pöttker [1] . . . . .	19
1.2	Rolo de tubo capilar típico . . . . .	20
2.1	Um modelo de compressor da família EM fabricado pela Embraco . . . . .	27
2.2	Câmaras de teste do Laboratório Aplicação . . . . .	29
3.1	Princípio de funcionamento do medidor: vazão mássica através do tubo provoca o aparecimento da força de Coriolis . . . . .	36
3.2	Válvula auto regulada de pressão . . . . .	40
3.3	Diagrama esquemático do aparato atual baseado no método tradicional proposto pela norma . . . . .	40
3.4	Aparato para medição de vazão em tubos capilares atual . . . . .	41
3.5	Princípio de medição de vazão do aparato atual . . . . .	41
4.1	Sensor Mass 2100 e transmissor Mass 6000 da Siemens . . . . .	44
4.2	Erro em % da vazão mássica atual com 95% de confiança do medidor da Siemens . . . . .	45
4.3	Sensor CMFS010 e transmissor 1700 da Micro Motion . . . . .	46
4.4	Erro em % da vazão mássica atual com 95% de confiança do medidor da Micro Motion . . . . .	47
4.5	Pressões de entrada recomendadas pela norma . . . . .	48
4.6	Incerteza de medição em % da vazão mássica medida dos medidores Mass 2100 e CMFS010M na faixa de interesse . . . . .	51
4.7	Medidores de vazão mássica acoplados ao aparato atual . . . . .	51
4.8	Amostras de tubos capilares utilizadas . . . . .	53

4.9	Erros de medição da bancada e dos medidores de vazão mássica em relação ao valor teórico em % absoluto . . . . .	56
4.10	Influência do diferencial de pressão na vazão de fluidos gasosos . . . . .	58
4.11	Curvas de vazão para o regulador Swagelok série KPR com Coeficiente de vazão 0,02 . . . . .	61
4.12	Regulador de pressão Swagelok série KPR . . . . .	62
4.13	Transmissor de pressão Velki . . . . .	62
4.14	Teste com regulador de pressão . . . . .	63
4.15	Resultado de um dos testes com o regulador de pressão . . . . .	63
4.16	Teste com regulador de pressão - condição de 2,7 bar . . . . .	64
4.17	Ampliação da figura 4.16 para uma melhor visualização dos detalhes do teste à condição de 2,7 bar com destaque para os limites da pressão do teste recomendados pela norma . . . . .	65
5.1	Esquema do novo aparato de teste baseado no método alternativo da norma . . . . .	68
5.2	Novo transmissor de pressão instalado no aparato atual . . . . .	70
5.3	Painel frontal da versão de desenvolvimento . . . . .	71
5.4	Arquivo típico gerado com a gravação dos dados monitorados pelo programa . . . . .	72
5.5	Manômetro digital selecionado para medir pressão no novo aparato experimental . . . . .	74
5.6	Válvula solenoide de duas vias . . . . .	75
5.7	Modelo 3D da montagem final na bancada . . . . .	76
5.8	Painel frontal da versão final . . . . .	76
6.1	Conversor USB ↔ RS-485 K-104 conectado ao transmissor de pressão	81
6.2	Conversor USB ↔ RS-485/RS-422 USB-i485 . . . . .	82
6.3	Esquema da rede criada para comunicação com os dispositivos de medição . . . . .	82

6.4	Programa em Labview para a versão de desenvolvimento do projeto . .	84
6.5	Programa em Labview para a versão final do projeto . . . . .	86
7.1	Ensaio de medição de vazão realizados com as amostras de tubos capilares 1 a 8 . . . . .	90
7.2	Ensaio de medição de vazão realizados com as amostras de tubos capilares 9 a 14 . . . . .	91
7.3	Detalhes do ensaio com a amostra 7 destacando-se as tolerâncias de pressão durante o teste . . . . .	92
7.4	Erro dos medidores de vazão mássica em relação ao valor teórico . . .	94
7.5	Erro da bancada atual em relação ao valor teórico . . . . .	95
7.6	Erro da bancada atual em relação ao medidor CMFS010 . . . . .	95
7.7	Erro da vazão instantânea no instante de 60 s em relação à vazão média	97
7.8	Comparação dimensional entre aparato atual e o modelo do novo aparato de medição . . . . .	98



# ***Lista de Símbolos***

## **SÍMBOLOS**

$D_{capilar}$	Diâmetro interno do tubo capilar, mm
$G_g$	Gravidade específica do gás, adimensional
$L_{capilar}$	Comprimento do tubo capilar, m
$P_e$	Pressão na entrada do tubo capilar, bar
$P_{e,bancada}$	Pressão na entrada do tubo capilar medida pelo transdutor da bancada, bar
$P_{e,trans}$	Pressão na entrada do tubo capilar medida pelo transdutor adicional instalado na bancada, bar
$p_1$	Pressão de entrada, bar
$p_2$	Pressão de saída, bar
$Q_l$	Vazão volumétrica de $N_2$ , l/min
$Q_m$	Vazão mássica de $N_2$ , kg/h
$Q_{m,Instantânea}$	Vazão mássica instantânea de $N_2$ lida do transmissor do medidor de vazão mássica, kg/h
$Q_{m,Média}$	Média da vazão mássica de $N_2$ no período estável, kg/h
$\dot{Q}_{cond}$	Taxa de transferência de calor do condensador, W
$\dot{Q}_{evap}$	Taxa de transferência de calor do evaporador, W
$T$	Temperatura, °C
$T_1$	Temperatura à montante da válvula, K
$\dot{W}$	Trabalho realizado pelo compressor, J

## LETRAS GREGAS

$\rho$  Massa específica,  $\text{kg.m}^{-1}$

$\Delta p$  Redução da pressão ao longo do tubo, bar

## SUBSCRITOS

$()_{\text{mín}}$  mínimo

$()_{\text{máx}}$  máximo

# 1 *Introdução*

## 1.1: Contextualização

A refrigeração tem um papel primordial na sociedade contemporânea com aplicações nas mais variadas áreas, desde o resfriamento de componentes eletrônicos na indústria de tecnologia até a conservação de alimentos nos domicílios [1]. Principalmente nessa última, ainda que pouco conhecido pelos que não trabalham diretamente com o assunto, um componente exerce uma tarefa fundamental nos circuitos de refrigeração: o tubo capilar. Ter o domínio sobre esse dispositivo é um requisito primordial no âmbito da refrigeração.

A importância da refrigeração na vida do homem começou a ser notada já na pré-história, no momento em que se percebeu um aumento na durabilidade dos alimentos quando estes eram conservados a baixas temperaturas, permitindo que não fosse necessário caçar com tanta frequência [2]. Iniciou-se, então, uma procura por formas de produzir frio.

Relatos indicam que os primeiros povos a utilizarem a refrigeração foram os chineses, que por volta de 1000 a.C já cortavam e armazenavam gelo obtido em rios e lagos. Gregos, romanos e hebreus coletavam neve e a depositavam em abrigos e buracos no solo sob a proteção de algum material isolante como madeira ou palha. Egípcios e indianos colocavam bebida em jarros de barro, deixando-os ao ar livre para que resfriassem durante a noite [2].

Porém, a obtenção de recursos naturais no auxílio à refrigeração era limitada, principalmente nas épocas mais quentes do ano. Assim, crescia a necessidade de se descobrir novas maneiras para a produção de frio.

O primeiro método de refrigeração artificial foi demonstrado por William Cullen na metade do século XVIII. O escocês produziu gelo a partir da evaporação do éter, não despertando, porém, nenhum interesse na época [1]. A partir do século seguinte

houve uma intensificação das pesquisas na área, destacando-se a criação do ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor por Oliver Evans, em 1805, e a elaboração de um sistema mecânico por Jacob Perkins, em 1834.

Somente em 1856 o primeiro equipamento comercial para a produção de frio baseado no princípio de refrigeração por compressão mecânica de vapor foi introduzido. O equipamento foi desenvolvido pelo escocês James Harrison e era destinado às indústrias de bebidas e alimentos [2].

Até o início do século XX, os sistemas de refrigeração mecânica eram utilizados principalmente em âmbito industrial, sendo geralmente equipamentos de grande porte movidos por máquinas a vapor. O risco de vazamento de fluidos refrigerantes tóxicos, o alto custo, as grandes dimensões e ainda a ausência de sistemas de controle adequados eram fatores que dificultavam a utilização de sistemas de refrigeração em aplicações domésticas e comerciais de pequeno porte [1].

Com a invenção da eletricidade e do motor elétrico, em 1918 a Kelvinator Co comercializou os primeiros refrigeradores elétricos. A popularização destes sistemas se consolidou com o lançamento do General Electric Monitor Top, que introduziu os compressores herméticos [1].

Os avanços tecnológicos nas décadas seguintes possibilitaram uma série de melhorias nos refrigeradores, como o emprego de fluidos refrigerantes não-tóxicos, redução das dimensões e custo, bem como um aumento da eficiência. Ao longo dos anos, a refrigeração extrapolou a área de conservação de alimentos, passando também a ser importante em outras áreas (eletro-eletrônica, hospitalar, telecomunicações, entre outras).

## **1.2: Sistema de Refrigeração**

O crescente desenvolvimento tecnológico visto ultimamente possibilitou uma melhora substancial nos refrigeradores, introduzindo modificações tanto de natureza eletrônica (como controle do tempo de degelo) quanto de natureza mecânica (como compressor de velocidade variável). Toda essa evolução vem sempre buscando uma maximização da performance ao mesmo tempo em que procura uma redução de custos.

A maior parte dos refrigeradores funciona de acordo com o princípio de com-

pressão mecânica de vapor, sendo compostos basicamente por quatro componentes: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. Os dispositivos necessitam de um fluido de trabalho, denominado refrigerante, e são interligados formando um ciclo termodinâmico, conforme a figura 1.1.

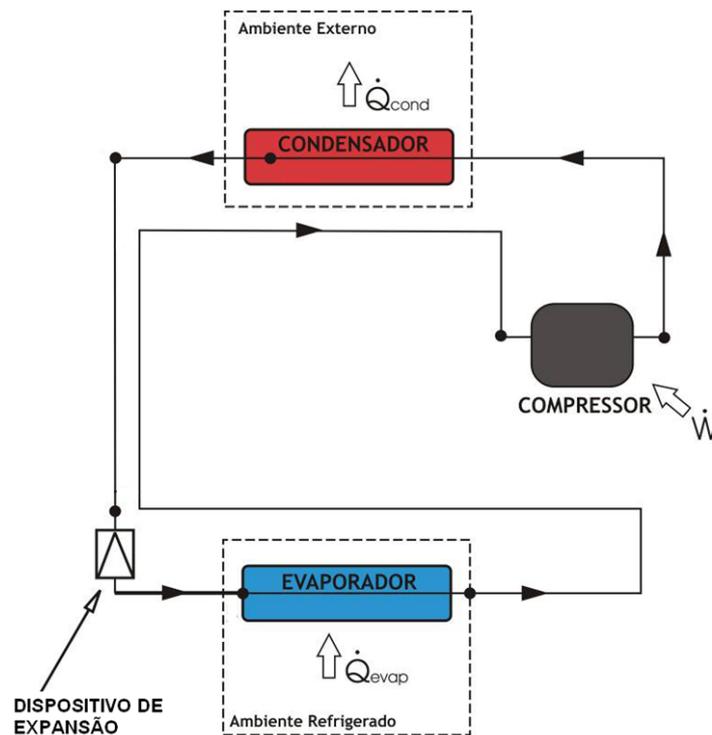


Figura 1.1: Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor. Adaptado de Pöttker [1]

O fluido refrigerante, no estado de vapor superaquecido e a baixa pressão, é succionado pelo compressor, onde é comprimido mediante a realização de trabalho ( $\dot{W}$ ). Após o compressor, o fluido segue para o condensador, onde sofre resfriamento, condensação e sub-resfriamento ao rejeitar calor ( $\dot{Q}_{cond}$ ) para o ambiente externo. Na sequência, o líquido a alta pressão passa pelo dispositivo de expansão, gerando uma mistura de líquido e vapor a baixa pressão e temperatura. Ao chegar ao evaporador, a mistura líquido-vapor absorve calor ( $\dot{Q}_{evap}$ ) do ambiente refrigerado, tornando-se vapor.

A função do dispositivo de expansão é de regular a passagem do fluxo de refrigerante no evaporador e conseqüentemente a quantidade de vapor a ser succionado pelo compressor. Em sistemas de refrigeração de pequeno porte, como condicionadores de ar residenciais, refrigeradores domésticos, freezers e bebedouros, o dispositivo de expansão mais utilizado é o tubo capilar.

### 1.2.1: Tubo Capilar

Tubos capilares são obtidos através do processo de trefilação, no qual um tubo é tracionado através de uma matriz que determina o diâmetro final da peça. Possuem diâmetro reduzido (0,5 mm a 2,0 mm) e comprimento relativamente longo (1 m a 6 m). São normalmente confeccionados em cobre e não possuem partes móveis. Sua ampla utilização é justificada principalmente por seu baixo custo e por promoverem a equalização das pressões do sistema (lado de sucção e descarga) durante a parada do compressor, permitindo a utilização de compressores de baixo torque de partida.

Por outro lado, oferecem riscos de obstrução, dependem da carga de refrigerante para atingir a condição de operação desejada e causam perda na eficiência energética quando o sistema opera fora das condições de projeto. A figura 1.2 mostra um rolo de tubo capilar na forma em que é normalmente comercializado.



Figura 1.2: Rolo de tubo capilar típico

O tubo capilar isola os lados de alta e baixa pressão do ciclo de refrigeração. Isso acontece porque o refrigerante líquido (alta pressão) que entra no tubo capilar perde pressão à medida que escoar por ele, em virtude do atrito e da aceleração do fluido. A diferença de pressão desejada pode ser obtida combinando-se os valores do diâmetro interno e comprimento do capilar. Além da pressão, a vazão também será alterada. Percebe-se que quanto maior a fricção, maior será a diferença de pressões observada nos lados de alta (condensador) e baixa pressão (evaporador). Um aumento na fricção pode ser obtido com aumento no comprimento e/ou diminuição no diâmetro interno do capilar. Uma excessiva restrição no capilar ocasionará reduções

no fluxo de refrigerante ao evaporador e queda no rendimento do compressor.

O dimensionamento do tubo capilar tem efeito direto na eficiência energética do sistema, devendo ser realizado com base na carga térmica e nas condições de operação. Uma vez definida a geometria do tubo capilar, não é mais possível ajustar a vazão de refrigerante em função da carga térmica ou da temperatura ambiente. Dessa forma, operações fora das especificações de projeto sempre causam reduções no coeficiente de performance (COP<sup>1</sup>) do sistema.

Para cada sistema de refrigeração e seus respectivos componentes instalados, é possível ter configurações distintas, as quais fazem com que a vazão de fluido refrigerante seja maior ou menor. O ajuste ideal dessa vazão servirá para alimentar corretamente o sistema e o compressor nele instalado. Assim, os trocadores de calor (evaporador e condensador) serão devidamente alimentados com a quantidade e a vazão correta de fluido refrigerante. Essa vazão correta depende basicamente da carga de refrigerante inserida no sistema e do adequado dimensionamento do compressor e do tubo capilar.

Dentre os componentes principais do circuito, o compressor é o primeiro a ser escolhido no projeto de um sistema de refrigeração. O projetista o faz com base nas necessidades da sua aplicação e no tipo de fluido refrigerante que será usado. Leva-se em conta também que o seu custo é muito mais alto em comparação aos outros componentes, que são escolhidos e projetados em função deste.

O projetista de uma unidade de refrigeração dotada de tubo capilar deve escolher o diâmetro e o comprimento do tubo de modo que o ponto de equilíbrio corresponda à temperatura de evaporação desejada. Existem maneiras de calcular com exatidão o volume do dispositivo de expansão (tubo capilar), chegando-se a uma dimensão teórica (comprimento X diâmetro). Mas se trata de uma operação complexa, que é possível substituir pelo método adotado por inúmeros especialistas, baseado na sua experiência prática. Assim, um tubo mais comprido que o de projeto é instalado no sistema, resultando uma temperatura de evaporação mais baixa que a desejada. A seguir o tubo é cortado sucessivamente até a obtenção da condição de equilíbrio desejada.

O comprimento e o diâmetro do capilar podem ser variados inúmeras vezes

---

<sup>1</sup>O COP é um coeficiente comumente utilizado para analisar a eficiência energética de um ciclo de refrigeração. É definido como sendo a razão entre a taxa na qual o calor é retirado pelo evaporador (denominada de capacidade de refrigeração) e a potência fornecida ao compressor.

até que se alcance a configuração mais eficiente para o sistema mais eficiente. A finalização dos resultados pode levar semanas ou meses, dependendo do sistema e da experiência do projetista. Esse processo pode ser acelerado e otimizado caso seja conhecida a vazão ótima, obtida teoricamente. O processo resume-se a uma escolha inicial de capilar com base em tabelas e gráficos específicos, disponíveis no meio de refrigeração e que foram elaborados experimentalmente [3]. O comprimento inicial do tubo é intencionalmente escolhido maior, já que ele pode ser facilmente reduzido e o contrário não é possível. Basta conectar o capilar a um aparato que meça a sua vazão e cortá-lo até que atinja a vazão desejada. Mesmo após o alcance da vazão teórica ótima podem ser necessários mais algumas modificações no capilar até ser obtida a vazão prática ótima. A diferença entre o valor teórico e o prático deve-se às particularidades de cada sistema, sendo os últimos ajustes também realizados experimentalmente.

No procedimento puramente experimental, não há parâmetro de avaliação relacionado diretamente ao tubo capilar, como a vazão, por exemplo. É necessário conectar o capilar ao sistema a cada alteração no seu comprimento, verificar as temperaturas e pressões do sistema. O procedimento é muito mais trabalhoso, demorado e impreciso, em comparação à utilização da medição da vazão no dimensionamento do capilar. A carga de refrigerante é o último elemento a ser determinado e depende das condições de projeto e operação do sistema (temperaturas e pressões).

Outra utilidade da medição de vazão em tubos capilares é na definição dos parâmetros do sistema, após a definição do tubo capilar ideal para determinada aplicação. Realizar uma inspeção dimensional (medir comprimento e diâmetro interno) no capilar é caro e ineficiente, tendo em vista as variações no diâmetro e rugosidade interna existentes ao longo do comprimento do mesmo, as quais têm influência direta no seu desempenho. Nesse sentido, escolher a vazão através do tubo como parâmetro é muito mais eficiente. Projetar um aparato experimental que seja capaz de realizar a medição de vazão em tubos capilares é o objetivo maior deste trabalho.

### **1.3: Objetivos**

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Aplicação, setor de R&D (*Research and Development*) da Embraco, tomando-se como base um equipamento de mesma finalidade já existente na empresa, porém pertencente a outro laboratório. O que se

pretende é realizar a especificação dos componentes para a construção de um novo aparato para medição de vazão em tubos capilares. A nova bancada, que será de uso exclusivo do Laboratório Aplicação, deve apresentar um desempenho compatível com as necessidades atuais de uma empresa líder de mercado, as quais a bancada atual já não atende plenamente, tendo em vista seu princípio de operação e funcionamento amplamente manual.

As características desejáveis do novo dispositivo foram obtidas com base na bancada já existente e no modo como os testes de medição de vazão de tubos capilares são feitos atualmente. As particularidades a serem atendidas pelo novo equipamento são:

- estar de acordo com a devida norma [4];
- apresentar uma faixa de medição que abranja os capilares utilizados na empresa;
- apresentar maior velocidade de medição em comparação com a bancada atual;
- ser mais compacto e possuir maior portabilidade;
- fazer o controle automático da pressão de teste (opcional);
- ser mais sustentável.

## 1.4: Justificativas

Como comentado na seção 1.3, a empresa já possui um equipamento para medição de vazão em tubos capilares. No entanto, há uma demanda de utilização do aparato por parte do Laboratório Aplicação, que esbarra na corriqueira ocupação do mesmo em virtude do seu frequente uso pelo Laboratório Tribologia, detentor da bancada.

Aliado a isto, há o fato de que o aparato experimental existente foi construído há mais de uma década, sendo que as necessidades atuais da empresa incorrem por um equipamento mais rápido e portátil. As justificativas para os melhoramentos apontados são mostradas a seguir.

- maior velocidade de medição: o aparato existente leva em média 6 min para realizar a medição de um tubo capilar. Pretende-se que esse tempo tenha, no mínimo, uma redução de 50%;
- mais compacto e com maior portabilidade: o equipamento utilizado atualmente é bastante grande e pesado, o que impossibilita o seu deslocamento. É desejável que se possa transportar sem grande esforço o novo dispositivo, facilitando a medição de tubos capilares que não podem ser retirados do sistema ao permitir que o aparato de medição seja movido até bem próximo do objeto em teste. O procedimento atual para esse caso é o deslocamento do refrigerador do Laboratório Aplicação até o Laboratório Tribologia, onde se faz o uso de mangueiras para que o capilar do refrigerador a ser medido alcance os devidos engates na bancada de teste;
- controle automático da pressão de teste: nas medições feitas com o aparato existente a regulagem da pressão do teste é manual. Para que a pressão permaneça constante, é necessária a presença do operador durante todo o procedimento, monitorando-a e controlando-a através de pequenos ajustes na válvula de controle de pressão. Um objetivo desejável é que no novo equipamento o controle da pressão de teste seja automático;
- ser mais sustentável: o aparato atual gasta cerca de 20 l de água na medição de cada capilar. Pretende-se eliminar esse consumo.

Outros laboratórios da empresa utilizam com sucesso medidores de vazão mássica em aplicações com vazões bem reduzidas, como a evidenciada em tubos capilares. A ideia inicial do projeto é a de utilizar medidores desse tipo na construção do aparato alvo, aproveitando o fato de que há dois medidores de vazão mássica disponíveis para testes. Um dispositivo é da fabricante Siemens e outro da Micro Motion.

O que se deseja é analisar a viabilidade de se utilizar esse tipo de medidor na medição de vazão em tubos capilares, saber se estes medidores estão aptos para utilização na nova bancada (atendem às características desejadas) e descobrir qual medidor é o mais adequado para a aplicação desejada. Ao fim do projeto, ter-se-ão definidos os principais equipamentos a serem utilizados na construção do novo aparato experimental, para que, posteriormente, o laboratório possa realizar a sua compra e a montagem da bancada. O elemento medidor de vazão é o principal desses dispositivos.

## 1.5: Estrutura do Documento

Para a documentação do trabalho, o conteúdo do mesmo foi dividido em nove capítulos, a fim de facilitar a exposição das ideias.

Este primeiro capítulo serviu para introduzir o leitor no assunto. Falou-se um pouco da história da refrigeração, sua relevância e do destacado papel do dispositivo de expansão, mais precisamente do tubo capilar e da importância da medição da vazão através dele no dimensionamento deste em um ciclo de refrigeração.

No capítulo 2 é apresentada a empresa onde o trabalho foi realizado (Embraco), destacando o papel do Laboratório Aplicação, para o qual o aparato foi desenvolvido.

O capítulo 3 aborda alguns aspectos conceituais necessários ao desenvolvimento e entendimento do trabalho. É discursado brevemente sobre os elementos de um sistemas de medição, medição de vazão e válvulas reguladoras de pressão. Também é apresentado o aparato experimental base.

No capítulo 4 é feita uma análise teórica e prática dos medidores de vazão estudados, bem como a descrição do método utilizado na seleção do regulador de pressão.

Após a definição dos principais equipamentos que vão compor a nova bancada, no capítulo 5 é descrito o projeto em si, tratando de como será a interação entre os componentes. O projeto é tratado em termos de duas versões: uma de desenvolvimento e outra final. No capítulo 6 é tratada a implementação do que foi descrito no capítulo 5, mostrando como foi realizada a comunicação com os dispositivos utilizados e o software que foi desenvolvido.

No capítulo 7 são apresentados e discutidos os resultados do projeto. E finalmente há o capítulo conclusivo, no qual são apresentadas as constatações finais do trabalho realizado e dos resultados obtidos.



## 2 *Embraco*

A Whirlpool S.A. - Unidade Embraco de Compressores e Soluções de Refrigeração (Embraco) é uma empresa global, líder mundial no mercado de compressores herméticos, com capacidade produtiva superior a 30 milhões de unidades ao ano. Possui unidades em seis países (Brasil, China, Eslováquia, Itália, Estados Unidos e México), a partir dos quais atende 80 mercados em todos os continentes. Com foco na produção, tem cinco fábricas de compressores, três fábricas de componentes para compressores (peças e controles eletrônicos) e uma fundição.

A empresa tem sede em Joinville, Santa Catarina, onde foi fundada, em 1971. Em 2006, a Embraco, até então uma empresa de capital aberto, passou por uma reorganização societária que a uniu à fabricante de eletrodomésticos Multibrás. Assim, formou-se no Brasil a empresa Whirlpool S.A., controlada pela norte-americana Whirlpool Corporation, acionista das duas organizações desde a década de 1990. As duas operações, de eletrodomésticos e de compressores, continuam a operar como unidades de negócio independentes, mantendo suas especificidades e peculiaridades.



Figura 2.1: Um modelo de compressor da família EM fabricado pela Embraco

A liderança mundial em compressores para refrigeração resulta da qualidade e da tecnologia de ponta dos produtos e de serviços diferenciados. São mais de

três décadas de investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento. A empresa investe historicamente cerca de 3% da receita líquida anual no custeio de P&D. O reconhecimento internacional do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Embraco pode ser atestado pelas 1030 cartas-patentes já obtidas pela organização em âmbito mundial. Atua nessa área uma equipe de cerca de 450 profissionais divididos em mais de 40 laboratórios.

## 2.1: Laboratório Aplicação

No setor de P&D da Embraco, está localizado o Laboratório Aplicação, onde são realizados testes de todo o sistema de refrigeração para avaliar como o compressor funciona dentro do conjunto. O laboratório possui 17 câmaras, sendo que 16 delas trabalham com produtos da linha doméstica (refrigeradores, bebedouros) e 1 câmara para produtos comerciais de grande porte (ilhas, resfriadores de leite, etc.). Os principais testes realizados pelo laboratório são:

- teste de pull-down (abaixamento de temperatura): avalia o sistema de refrigeração (refrigerador, congelador, expositor etc.) como um todo (sistema de partida, carga de gás refrigerante, curva característica das pressões de trabalho, tempo de pull-down, temperaturas máximas e mínimas atingidas, desempenho dos produtos e componentes etc.);
- determinação da carga de refrigerante: determina a carga ideal de refrigerante levando em conta as temperaturas internas e externas. Também verifica a eficiência do evaporador, a potência consumida e serve para otimizar o funcionamento de todos os componentes;
- consumo de energia: determina o consumo de energia do produto, sendo empregado principalmente para classificar produtos nas categorias definidas pelo Selo Procel de economia de energia;

Dentre as atividades do laboratório, destacam-se:

- teste de desenvolvimento de produtos/pesquisa: o compressor é montado em uma unidade de refrigeração, observando seu desempenho em condições de funcionamento (temperatura, umidade, carga térmica). Esse tipo de teste acontece quando o produto ainda está na sua fase de concepção. Após o projeto e



Figura 2.2: Câmaras de teste do Laboratório Aplicação

a montagem do protótipo o compressor necessita ser aprovado em uma série de quesitos passando por testes em laboratórios de diversas áreas (acústica, elétrica, mecânica, entre outras), sendo o Laboratório Aplicação um desses;

- testes com sistemas de clientes: avaliam-se os sistemas e procura-se orientar o cliente sobre o dimensionamento do seu produto com base nos resultados de desempenho do compressor Embraco. O objetivo é adequar os sistemas dos clientes às suas necessidades. Testes para certificações externas também são realizadas;
- testes com foco em qualidade: são testes desenvolvidos com a finalidade de verificar impactos de eventuais desvios do processo produtivo. Seus resultados podem liberar ou bloquear um lote de produto.

Como comentado, uma das funções do Laboratório Aplicação é fornecer assistência aos clientes da Embraco. Muitos deles o usam como consultor no desenvolvimento dos seus projetos. Como não possuem estrutura adequada para validar seus produtos, a Embraco lhes oferece esse suporte testando-os e sugerindo modificações. Pode-se citar o exemplo de uma empresa produtora de refrigerantes. Ela não fabrica o sistema de refrigeração, apenas vende o xarope. Mas tem exigências, por exemplo, em relação a como esse produto é entregue ao consumidor.

Uma das alterações constantemente sugeridas é o redimensionamento do tubo capilar, o qual tem a vantagem de promover significativas mudanças no desempenho do sistema sem modificações significativas na sua estrutura. Após o dimensionamento do capilar, é de suma importância que a vazão do tubo capilar seja medida e passada para o cliente. O diâmetro e o comprimento do capilar obtidos no final do dimensionamento devem servir apenas de base no desenvolvimento do sistema, visto que capilares de mesma dimensão podem apresentar vazões mássicas diferentes. Em experimentos realizados no Laboratório Aplicação já chegou-se a verificar até 60 cm de diferença de comprimento entre dois capilares de um mesmo rolo, com diâmetro e vazão mássica iguais. Isso deve-se ao processo de trefilação, modo pelo qual os capilares são obtidos e que, muitas vezes, acaba alongando e restringindo os mesmos em determinados trechos do rolo de tubo capilar.

O projeto de um aparato para medição de vazão em tubos capilares é o principal objetivo deste trabalho.

## 3 *Sistemas de Medição*

Antes de entrar no assunto específico de medição de vazão, é importante destacar alguns conceitos chave quando se trata de sistemas de medição. Um sistema genérico de medição consiste dos seguintes elementos básicos [5]:

- sensor: detecta e converte a entrada desejada para uma forma mais conveniente e prática a ser manipulada pelo sistema de medição. Também chamado de elemento primário, constitui a interface do instrumento com o processo;
- condicionador de sinal: manipula e processa a saída do sensor de forma conveniente, adequando o sinal à transmissão. As principais funções desse elemento são as de amplificar, filtrar, integrar e fazer conversões de sinal analógico para digital e digital para analógico;
- mostrador: fornece a informação da variável medida na forma quantitativa. Também é chamado de *display* e constitui a interface do instrumento com o operador do processo.

### 3.1: Instrumentos de Medição

Um instrumento de medição pode ser constituído de um ou mais dos elementos básicos anteriormente citados, além de outros elementos auxiliares, dependendo da sua finalidade. Os instrumentos podem ser utilizados individualmente ou interligados, formando uma malha, para realizar uma determinada tarefa nos processos industriais. Pode-se classificar os instrumentos e dispositivos utilizados em instrumentação de acordo com a função que desempenham no processo.

### 3.1.1: Indicador

Instrumento que sente e mostra uma variável de processo através de um conjunto escala-ponteiro (analógico) ou através de números (digital) [5]. Os indicadores podem assumir nomes especiais em função da variável indicada: termômetro (indicador de temperatura), manômetro (indicador de pressão) e rotâmetro (indicador de vazão). A malha de indicação é passiva e aberta. Quanto ao local da montagem, o indicador pode ser local ou remoto (em um painel central, por exemplo). Quando há a manipulação remota do sinal, utiliza-se um transmissor.

### 3.1.2: Transmissor

É um instrumento que sente a variável de processo e gera na saída um sinal padrão, proporcional ao valor desta variável. É aplicado no envio de sinais que serão manipulados remotamente, bem como padronização e isolamento de sinais. Os transmissores eletrônicos baseiam-se no amplificador operacional, convertendo o sinal da variável (pressão, temperatura, vazão, nível) em um sinal padrão (os mais comuns são tensão e corrente) através de detectores indutivos, capacitivos ou resistivos[5]. São alimentados com tensão nominal de 24 V cc.

#### 3.1.2.1: Transmissor Inteligente (*Smart Transmitter*)

Transmissor que incorpora um microprocessador em seu circuito eletrônico. Por esse motivo, possui funções adicionais [6] como:

- linearização do sinal dos elementos sensores individuais;
- compensação de alterações nas variáveis que interfiram na variável de processo (como compensação de temperatura);
- calibração automática;
- mudança da faixa calibrada;
- diagnóstico automático dos seus circuitos e peças internas;
- fixação do valor da variável no último valor obtido, quando há irregularidades na malha;

- visualização de dados configuração, faixa calibrada e de outros parâmetros, através de um comunicador portátil, que pode ser ligado em qualquer ponto da linha de transmissão. Vários transmissores inteligentes também permitem a comunicação via RS-232C ou RS-485, permitindo a sua conexão a um computador pessoal e configuração dos seus parâmetros por meio de software.

### **3.1.3: Transdutor**

Genericamente, transdutor é qualquer dispositivo que transforma a grandeza do sinal de entrada, segundo uma determinada lei, disponibilizando na saída uma grandeza diferente[5]. Deste ponto de vista, o elemento sensor e o transmissor são considerados transdutores.

Resumidamente, tem-se:

- elemento sensor: possui entrada e saída não-padronizadas;
- transmissor: possui entrada não-padronizada e saída padronizada;
- transdutor: possui entrada e saída padronizadas.

## **3.2: Medição de Vazão**

Na indústria, a medição de vazão é considerada uma tarefa crítica em quase todos os processos que envolvem fluidos, tendo em vista a importância de se conhecer a vazão no dimensionamento e controle do sistema, e ao mesmo tempo a complexidade de fazê-lo de maneira eficiente sem interferir significativamente no processo.

A vazão de fluidos é complexa e nem sempre está sujeita à análise matemática exata. Diferentemente do sólido, os elementos de um fluido podem mover-se em velocidades e acelerações diferentes, dificultando bastante a tarefa da medição.

### **3.2.1: Conceito de Vazão**

Vazão é a quantidade de um elemento, expressa em massa ou volume, que passa por um ponto de referência, por unidade de tempo. A unidade de vazão é a unidade de volume por unidade de tempo ou a unidade de massa por unidade de

tempo. A vazão volumétrica é igual ao produto da velocidade do fluido pela área da seção transversal da tubulação. A vazão mássica é igual ao produto da vazão volumétrica pela massa específica do fluido. Na prática, a medição direta da massa específica do fluido é difícil, e são utilizadas medições de temperatura e pressão para inferí-la, visto que a composição dos gases é constante [5].

### **3.2.2: Vazão em Tubulação**

Em aplicações industriais de medição da vazão, o mais comum é que os fluidos sejam transportados em tubulações fechadas com seção circular. A circunferência proporciona a maior resistência estrutural e apresenta a maior área transversal por unidade de superfície da parede [5].

Para transferir um fluido de um ponto A para um ponto B de um processo, coloca-se uma tubulação ligando os dois pontos e instala-se uma bomba no ponto A desta tubulação. Devido ao atrito entre a tubulação fixa e o fluido móvel, esse deve ser pressurizado para que escoe. Ou seja, para que haja vazão do fluido através da tubulação, a pressão na saída da bomba (ponto A) deve ser maior que a pressão no ponto B. Essa diferença de pressão produz a força que faz o fluido escoar através da tubulação. O fluido atinge um equilíbrio ou fica em vazão de regime permanente quando a força requerida para movê-lo através da tubulação é igual à força produzida pela diferença de pressão.

Vários parâmetros influem na queda de pressão ao longo da tubulação: o seu comprimento, o seu diâmetro interno, velocidade, densidade e viscosidade do fluido que se move através dela e o atrito provocado pela rugosidade da parede interna da tubulação no fluido.

### **3.2.3: Vazão Volumétrica ou Mássica**

Medidores industriais podem medir vazão volumétrica (volume/tempo) ou mássica (massa/tempo). A massa, ao lado do comprimento e do tempo, constitui a base para toda medida física [5]. Como um padrão fundamental de medição, a unidade de massa não é derivada de nenhuma outra fonte. As variações de temperatura, pressão, densidade, viscosidade, condutividade térmica ou elétrica não afetam a massa do fluido cuja vazão está sendo medida. Isso pode ser ilustrado com o exemplo da água, cujo estado físico (e conseqüentemente o volume) muda de acordo com as condições

de temperatura e pressão. Entretanto, 1 kg de massa de água é o mesmo esteja ela líquida, vapor ou sólida.

Hoje em dia, já é possível encontrar medidores diretos de vazão mássica, como o medidor tipo Coriolis. Visto que a massa do fluido independe das medições de outras variáveis do processo, como pressão, temperatura ou densidade, a medição da vazão mássica é mais vantajosa que a medição da volumétrica na maioria das aplicações.

Grande parte dos medidores industriais mede a velocidade e infere a vazão volumétrica do fluido. A partir da velocidade e da área da seção transversal da tubulação tem-se a vazão volumétrica. Como o volume do fluido compressível depende intrinsecamente da pressão e da temperatura, deve-se conhecer continuamente os valores da pressão e da temperatura para que o valor do volume tenha significado prático. Como a pressão estática e a temperatura do processo variam continuamente, os desvios dos valores padrão de projeto devem ser compensados medindo-se pressão e temperatura e fazendo-se correções, para que seja obtida uma vazão volumétrica compensada. Na prática, a maioria das vazões de gases necessita da compensação de pressão e temperatura, requerendo algumas aplicações, ainda, medição e compensação de densidade. Existem aplicações nas quais a temperatura é medida e seu valor utilizado para compensar a variação provocada simultaneamente no volume e na densidade do fluido.

### **3.3: Medidor tipo Coriolis**

A constância e a imunidade da massa às variações de temperatura, pressão, viscosidade, densidade, condutividade elétrica ou térmica e ao perfil de velocidade a tornam a propriedade ideal para ser medida.

O surgimento de um método prático para medição de massa em movimento é um evento recente. Até pouco tempo atrás, era preciso inferir a massa do volume, utilizando medidores de vazão volumétrica, que não medem a massa, mas o espaço que ela ocupa [5]. Assim, era necessário calcular os efeitos da temperatura e da pressão sobre a densidade, e então inferir a massa através do volume.

A medição efetiva da vazão mássica evita a necessidade de cálculos complexos. Como a massa não muda, uma medição desse tipo é proveniente de uma relação direta, sem a necessidade de correções e compensações devido às variações nas

propriedades do fluido.

O medidor baseado no efeito Coriolis opera pela aplicação da Segunda Lei de Newton, mostrada na equação (3.1) e que é utilizada para determinar a quantidade exata de massa fluindo através do medidor.

$$F = m.a \quad (3.1)$$

Onde  $F$  é a força em N,  $m$  a massa em kg e  $a$  a aceleração em  $m/s^2$ .

Ao escoar através do tubo sensor, a massa do fluido possui uma velocidade linear. Quando o tubo sensor é vibrado em sua frequência natural em torno do eixo, uma velocidade angular é gerada. Essas forças vibracionais, perpendiculares à vazão do fluido, causam uma aceleração na entrada e uma desaceleração na saída do tubo. O fluido exerce uma força oposta a si próprio, resistindo às forças perpendiculares do tubo e fazendo-o dobrar. Essa pequena força vibratória induzida pela vazão do fluido, medida por circuitos eletrônicos do medidor de vazão, é proporcional à vazão mássica. É a mesma força de Coriolis que faz com que as correntes de ar circulem em torno da Terra em rotação. A força de Coriolis é a única força significativa utilizada na determinação da vazão mássica direta [7].

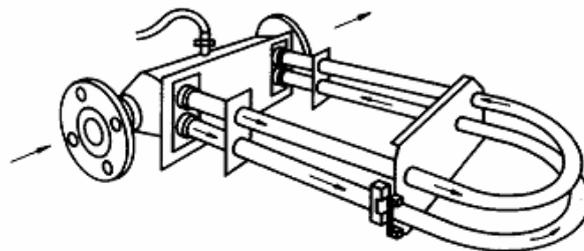


Figura 3.1: Princípio de funcionamento do medidor: vazão mássica através do tubo provoca o aparecimento da força de Coriolis

### 3.3.1: Efeito Coriolis

O efeito Coriolis é definido como a deflexão aparente de objetos movendo-se em linha reta em relação à superfície da Terra, a qual se encontra em rotação. Essa deflexão é para o lado direito, no hemisfério norte e para a esquerda, no hemisfério sul. Esse efeito foi inicialmente discutido pelo cientista francês Gaspard-Gustave Coriolis, na metade do século passado e atualmente é conhecida como aceleração ou força de

Coriolis [8].

O efeito Coriolis pode ser encontrado em uma série de fenômenos em que o movimento sobre a superfície terrestre está envolvido, como o fato de os rios no hemisfério sul forçarem mais sua margem esquerda do que a direita e de a água sair da pia girando no sentido horário no hemisfério sul e anti-horário no hemisfério norte [8].

### **3.3.2: Medidor Industrial**

Um objeto se movendo em um sistema de coordenadas que gira com uma velocidade angular, desenvolve uma força de Coriolis proporcional a sua massa, à velocidade linear do objeto e à velocidade angular do sistema.

Em um medidor tipo Coriolis, o fluxo do fluido de entrada é dividido entre dois tubos curvados, iguais e com diâmetros menores que a tubulação do processo. Eles seguem por trajetórias curvas e convergem na saída do medidor. Esses tubos estão oscilando em sua frequência natural, vibrados por bobinas eletromagnéticas. Como o tubo está vibrando, a amplitude e a direção da velocidade angular se alternam, criando uma força de Coriolis intermitente. Se os tubos curvados são suficientemente elásticos, as forças de Coriolis induzidas pela vazão mássica produzem neles pequenas deformações elásticas, as quais podem ser medidas e delas inferida a vazão mássica.

Em sua forma mais simples, o medidor de vazão Coriolis possui dois componentes básicos: sensor e transmissor eletrônico. O sensor é formado por um ou dois tubos instalados na tubulação em forma de U. Eles são vibrados em uma pequena amplitude, na frequência natural da estrutura, por meio de um sinal da bobina acionadora. A velocidade angular do tubo vibrante, em combinação com a velocidade de massa do fluido vazante, faz o tubo inclinar. A quantidade de inclinação é medida através de detectores de posição, colocados nas duas extremidades do tubo em U.

Com a passagem do fluido pelo tubo vibrante, o efeito Coriolis causa uma inclinação no tubo durante sua vibração. A inclinação é medida com um tempo de atraso entre as laterais do tubo e a medição é processada como uma onda senoidal. O tempo de atraso é diretamente proporcional à vazão mássica instantânea. Independentemente da inclinação, a frequência de vibração do tubo varia com a densidade do fluido do processo. Assim, além da medição da vazão mássica é possível medir também a densidade do fluido. Um sensor de temperatura, normalmente um termorresistor, é também usado para monitorar a temperatura.

### 3.4: Medição de Vazão em Tubos Capilares

A norma que regulamenta os testes para medição de vazão de tubos capilares é a ASHRAE 28 [4], *Method of Testing Flow Capacity of Refrigerant Capillary Tubes*. Nela são especificados um método tradicional e um alternativo, os dois utilizando nitrogênio seco na medição da vazão. Eles geram resultados comparáveis, porém o método alternativo é mais conveniente se forem utilizados instrumentos eletrônicos.

Os principais elementos especificados pela norma para a construção do aparato são um regulador de pressão ajustável e o próprio medidor de vazão. No método tradicional é citado um medidor de vazão de gás, que incorpore um termômetro e um manômetro para medição das temperatura e pressão do nitrogênio. O método alternativo especifica um medidor de vazão mássica, além de exigir que a saída seja apresentada como vazão volumétrica corrigida para as condições padrão de temperatura e pressão (21 °C e 1,01 bar). Quanto ao regulador de pressão não é feita uma diferenciação entre ambos modelos, tendo em vista que sua função é reduzir e controlar a pressão do gás vindo da fonte.

### 3.5: Regulador de Pressão

Como comentado em 3.2.2, para se deslocar um fluido entre dois pontos de um sistema basta que se mantenha uma diferença de pressão entre o trecho inicial e o final da tubulação na qual o fluido está confinado. Pensando-se em um processo a uma temperatura constante e que não sofra interferências externas, é unicamente o diferencial de pressão que controla a velocidade do escoamento do fluido, ou seja, é ele quem regula a sua vazão. Deste modo, tão importante quanto o equipamento que fará a medição da vazão em si é aquele que fará o papel de regular a pressão do sistema. Um sistema de medição e controle da pressão inadequado resultará em uma vazão inconstante, pouco adiantando medir a vazão em um processo de condição desconhecida.

Realizar o controle de determinado parâmetro significa medir a variável alvo, comparar com um valor pré-determinado e atuar no sistema de modo a minimizar a diferença entre a medida e o valor de referência. No caso específico do controle de pressão implica nos seguintes equipamentos:

- transmissor com sensor de pressão embutido;
- controlador que receba o sinal do transmissor e envie um sinal para a válvula de controle;
- transdutor i/p (corrente para pneumático), necessário quando o controlador é eletrônico e o atuador da válvula é pneumático
- válvula de controle, que atue modulando a vazão do fluido para alterar a pressão na linha.

Como alternativa, pode-se utilizar uma válvula auto-operada no lugar de todos esses elementos da malha de controle convencional. Também chamada de regulador, ela é uma válvula de controle com um controlador embutido, a qual é operada pela própria energia do fluido sendo controlado, não necessitando de fonte externa. A sua principal vantagem é o custo inferior, quando comparado ao custo total da malha convencional com transmissor, controlador e válvula de controle. Também requer um menor espaço para a sua instalação e operação. O principal ponto contra o regulador é o fato de grande parte dessas válvulas fazer purga do excesso de fluido para o ambiente, o que nem sempre é possível. No caso específico da aplicação em estudo isso não é um problema. O fluido de trabalho é o nitrogênio, o qual ser liberado tranquilamente na atmosfera, já que não é inflamável nem tóxico.

O regulador de pressão tem a função de reduzir a pressão de um gás ou líquido de uma fonte, como um cilindro ou compressor, para um valor de pressão mais baixo necessário por um dispositivo. O componente básico responsável pela operação do regulador é o diafragma. É ele quem compara o ponto de ajuste da manopla da válvula (convertido em uma força pela compressão ajustável da mola) com a pressão a ser regulada (convertida em outra força de diafragma em si) e ajusta a abertura da válvula para reduzir o erro entre estas duas pressões. Deste modo, o diafragma tem o papel simultâneo de elemento realimentador, dispositivo de detecção de erro e de atuador.

### **3.6: Aparato Experimental Base**

O aparato experimental base, pertencente ao Laboratório Tribologia, foi construído baseado no modelo tradicional da norma [4]. É composto basicamente pelo tubo capilar em ensaio e por um recipiente inicialmente em vácuo com um determinado volume d'água. O escoamento de nitrogênio passa pelo tubo capilar e entra no

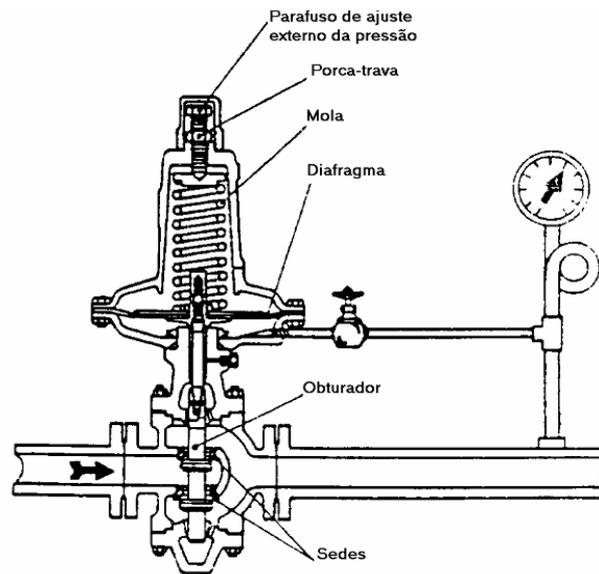


Figura 3.2: Válvula auto regulada de pressão

recipiente, deslocando um volume de água. Para medir esse volume deslocado no recipiente no tempo é utilizado um transdutor de nível capacitivo. Como o volume de água deslocado é igual ao volume de nitrogênio que entra no recipiente, a vazão volumétrica de ambos é a mesma. Assim, através da medição da vazão volumétrica de água sabe-se a de nitrogênio. Foi construído um circuito aberto com base no método tradicional proposto pela norma. Seu esquema é ilustrado na figura 3.3

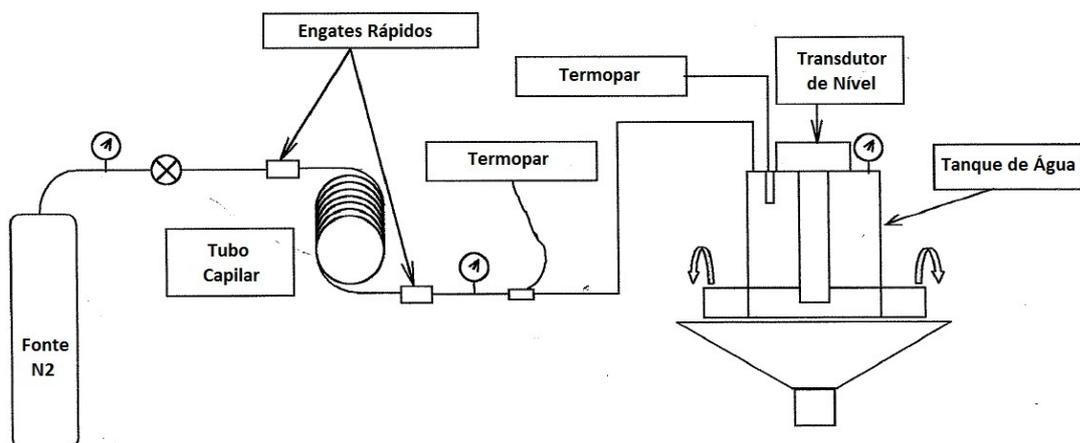


Figura 3.3: Diagrama esquemático do aparato atual baseado no método tradicional proposto pela norma

As figuras 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, a bancada existente e um esquema do princípio de medição no qual ela é baseada.



Figura 3.4: Aparato para medição de vazão em tubos capilares atual

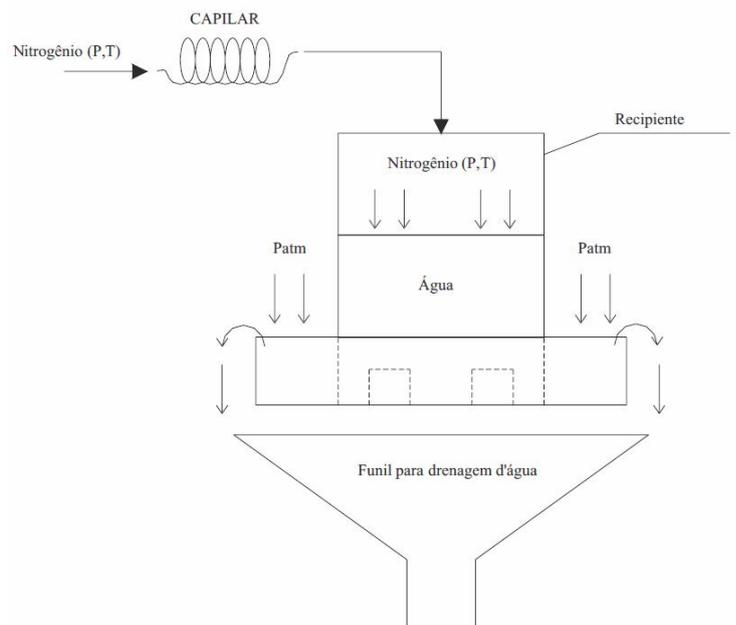


Figura 3.5: Princípio de medição de vazão do aparato atual

### **3.7: Considerações Finais**

O capítulo apresentou alguns fundamentos necessários no entendimento de um projeto de medição de vazão, citando os principais componentes presentes em um sistema desse tipo. Também apresentou-se brevemente a norma [4] que especifica a medição de vazão em tubos capilares. Finalmente, foi descrito o aparato experimental existente, o qual será utilizado como base para os testes dos possíveis novos dispositivos bem como para comparação dos resultados.

## **4 Especificação dos Componentes Principais**

O presente capítulo trata da escolha dos principais equipamentos que vão compor o novo aparato experimental: o medidor de vazão e o regulador de pressão. Eles são considerados os elementos chave por realizarem as funções elementares necessárias em um teste de medição de vazão em tubos capilares, as quais são as funções de regulação da pressão do teste e de medição da vazão em si. Como justificado na seção 1.4, para a medição da vazão serão utilizados medidores de vazão mássica.

### **4.1: Medidor de Vazão Mássica**

O projeto foi iniciado com o objetivo de construir uma bancada para medição de vazão em tubos capilares tomando-se por base dois equipamentos. São dois medidores de vazão mássica pertencentes a outro setor da empresa e que, enquanto aguardam sua utilização para as funções as quais foram adquiridos, estão disponíveis para testes. Desse modo, o que se pretende é comparar ambos medidores, analisando a viabilidade da sua utilização no aparato experimental a ser desenvolvido, e verificar qual deles melhor se adequa à aplicação desejada.

Primeiramente foi feita uma análise da especificação técnica de cada um dos medidores, analisando se eles estavam de acordo com os requisitos da norma [4]. Verificado isto, foi realizado um estudo para descobrir a faixa de vazão em que seriam aplicados os medidores, observando se eles contemplavam a faixa desejada. Após homologação teórica dos medidores, estes foram testados para validação e comparação dos equipamentos na prática.

### 4.1.1: Medidor de Vazão Mássica Siemens

O medidor de fluxo de massa da Siemens disponível é da família SITRANS F C MASSFLO<sup>®</sup>, cujo princípio de funcionamento é baseado no efeito Coriolis. É composto por um sensor modelo MASS 2100 DI 1.5 e transmissor modelo MASS 6000 19”.



Figura 4.1: Sensor Mass 2100 e transmissor Mass 6000 da Siemens

#### 4.1.1.1: Incerteza de Medição

A Tabela 4.1 reproduz os dados de incerteza de medição referentes a esse medidor informados pelo fabricante.

Tabela 4.1: Incertezas de medição para medição de vazão mássica de gases com sensor MASS 2100 e transmissor MASS 6000 da Siemens

<b>Faixa de operação [kg/h]</b>	0 a 65
<b>Estabilidade do zero [kg/h]</b>	0,001
<b>Incerteza combinada [% do valor medido]</b>	0,6
<b>Repetitividade [% do valor medido]</b>	0,05

A incerteza de medição apresentada é válida para vazões maiores que 1 kg/h. Para vazões menores que esse valor, deve-se utilizar a equação (4.1), cuja curva é plotada no gráfico da figura 4.2.

$$E = \pm \sqrt{(0,10)^2 + \left(\frac{0,01}{q_m}\right)^2} \quad (4.1)$$

Onde  $E$  é o erro em % e  $q_m$  é a vazão medida em kg/h.

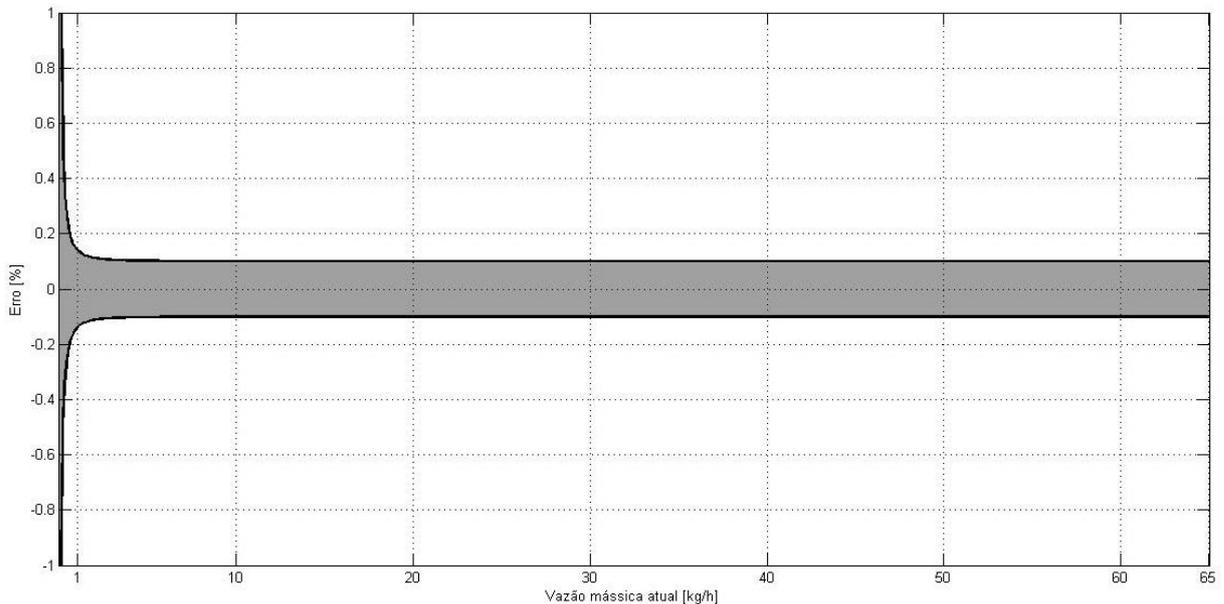


Figura 4.2: Erro em % da vazão mássica atual com 95% de confiança do medidor da Siemens

#### 4.1.1.2: Efeitos do Ambiente

Uma mudança na temperatura do fluido de processo de  $1^{\circ}\text{C}$  tem um efeito menor que  $\pm 0,0003\%$  da vazão atual no valor medido.

### 4.1.2: Medidor de Vazão Mássica Micro Motion

O medidor de vazão mássica da marca Micro Motion é da família ELITE, também baseado na tecnologia Coriolis. Seu sensor tem modelo CMFS010M e transmissor modelo 1700.

#### 4.1.2.1: Incerteza de Medição

As informações referentes à incerteza de medição desse par sensor/transmissor são apresentados na tabela 4.2.

Os dados de incerteza para gases mostrados na tabela são válidos para vazões superiores a  $0,576\text{ kg/h}$ , valor referente à divisão (estabilidade zero/incerteza combi-



Figura 4.3: Sensor CMFS010 e transmissor 1700 da Micro Motion

Tabela 4.2: Incertezas de medição para medição de vazão mássica de gases com sensor CMFS010M e transmissor 1700 da Micro Motion

<b>Faixa de operação [kg/h]</b>	0 a 108
<b>Estabilidade do zero [kg/h]</b>	0,002
<b>Incerteza combinada [% do valor medido]</b>	0,35
<b>Repetitividade [% do valor medido]</b>	0,20

nada). Segundo o fabricante, até essa vazão a incerteza deve ser calculada pela equação (4.2).

$$E = \pm \left( \frac{0,2}{Q_m} \right) \quad (4.2)$$

Onde  $E$  é o erro em % e  $Q_m$  é a vazão medida em kg/h.

A figura 4.4 mostra a incerteza de medição do equipamento abrangendo toda a sua faixa de atuação.

#### 4.1.2.2: Efeitos do Ambiente

Uma alteração de 1°C na temperatura do fluido de processo tem um efeito de  $\pm 0,0002$  % da vazão máxima no valor medido.

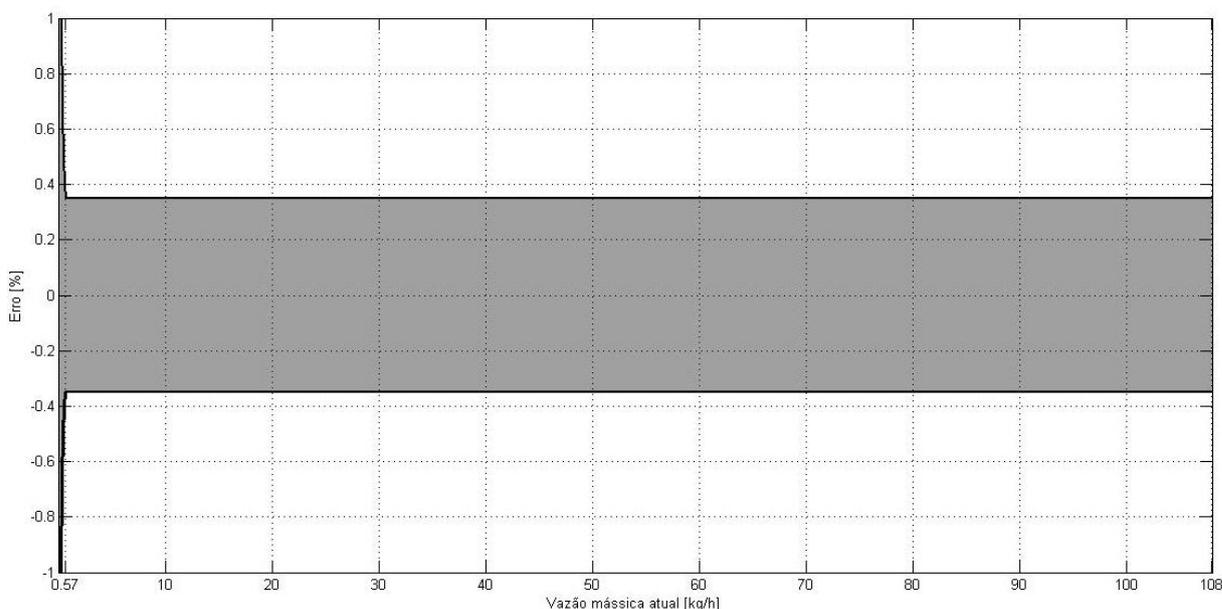


Figura 4.4: Erro em % da vazão mássica atual com 95% de confiança do medidor da Micro Motion

### 4.1.3: Faixas de Medição

A determinação das faixas de medição dos tubos capilares foi feita tomando-se como base um catálogo de aplicação de compressores da empresa [9], no qual dados dos tubos capilares são especificados para cada tipo de sistema. A tabela 4.3 contém as informações presentes no catálogo relevantes para o presente projeto.

Tabela 4.3: Dados dos tubos capilares para cada tipo de aplicação

Aplicação	$D_{capilar,min}$ [mm]	$D_{capilar,máx}$ [mm]	$l_{capilar,min}$ [m]	$l_{capilar,máx}$ [m]	$Q_{l,min}$ a 10 bar [l/min]	$Q_{l,máx}$ a 10 bar [l/min]
Refrigeradores	0,63	1,17	1,15	6,92	3,15	22,00
Congeladores	0,63	1,12	1,15	7,85	3,15	17,50
Balcão frigorífico	0,71	1,17	1,25	6,56	9,00	22,00
Bebedouros e Resf. Líq.	0,71	1,50	0,78	5,68	11,50	38,00
Desumidificadores de ar	0,71	1,50	0,40	5,50	12,50	56,50
Geral	0,63	1,50	0,40	7,85	3,15	56,50

É importante notar que a pressão informada na tabela 4.3 se refere à pressão aplicada na entrada do tubo capilar. O padrão é que se informe a vazão volumétrica à condição padrão de temperatura e pressão, ou seja, 1,01 bar e 21°C. Deste modo, os dados de vazão volumétrica apresentados neste trabalho sempre se referem à vazão na saída do tubo capilar, à condição padrão de temperatura e pressão, quando

determinada pressão é aplicada à sua entrada.

Ressalta-se também que as vazões apresentadas na tabela 4.3 são referentes a uma pressão de 10 bar na entrada do tubo capilar, o que foge das recomendações na norma, não podendo essas vazões serem utilizadas para determinar a faixa de aplicação do presente trabalho. Entretanto, é interessante que elas sejam analisadas no sentido de encontrar as condições de vazão máxima e mínima, já que nem todas as combinações de diâmetro/capilar são utilizadas na prática.

Segundo a norma [4], as pressões de entrada do teste devem ser determinadas conforme o diagrama da figura 4.5, tomando-se como base o comprimento e o diâmetro do capilar.

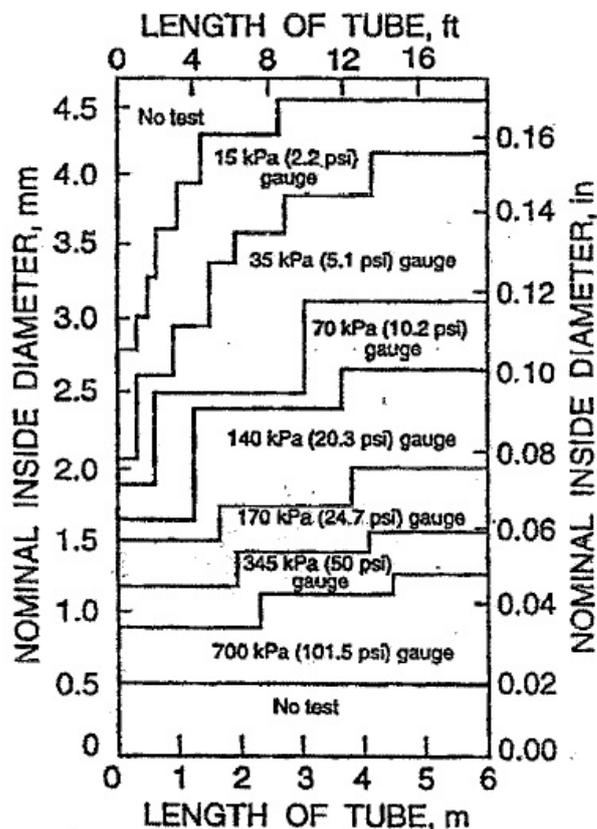


Figura 4.5: Pressões de entrada recomendadas pela norma

Com o intuito de encontrar a faixa de vazão para qual o novo aparato será usado, foram escolhidos dois pares de diâmetro e comprimento de capilar que correspondessem às vazões máxima e mínima contida no catálogo. Sabendo-se o comprimento e o diâmetro do capilar, obtém-se, pela figura 4.5, a pressão a ser aplicada na entrada do capilar no momento do teste. De posse desses dados, calculou-se o valor teórico dessas duas vazões, obtendo-se uma boa aproximação da faixa de vazão a qual o

novo aparato deve contemplar.

Pode-se obter uma boa aproximação da vazão volumétrica de um tubo capilar através da equação (4.3). A equação foi obtida através de ensaios experimentais por Kipp e Schimdt [10], tendo uma fórmula parecida já sido anteriormente apresentada por Bäckström [11].

$$Q_l = \frac{2,5\sqrt{P_e^2 - 1}D_{capilar}^{2,5}}{\sqrt{l_{capilar}}} \quad (4.3)$$

Onde  $Q_l$  é a vazão em l/min na saída do tubo capilar, à pressão de 1,01 bar e temperatura 21°C.  $P_e$  é a pressão absoluta na entrada do capilar em bar,  $D_{capilar}$  e  $l_{capilar}$  são diâmetro interno (mm) e comprimento (m) do capilar, respectivamente.

A tabela 4.3 informa que, dentre as aplicações da empresa, a menor vazão é de 3,15 l/min (0,0525 l/s) e a maior 56,50 l/min (0,9417 l/s), quando é aplicada uma pressão de 10 bar na entrada do tubo capilar. O catálogo de aplicação de compressores traz três combinações de diâmetro e comprimento de tubo para cada vazão. Escolheu-se dentre as três alternativas, aleatoriamente, um par diâmetro/comprimento para cada condição. Utilizando-se a equação 4.3 e a pressão de teste recomendada pela norma, ilustrada na figura 4.5, foi possível calcular a faixa de vazão volumétrica teórica a ser utilizada. Para que essa informação tenha sentido no escopo dos medidores de vazão mássica em estudo, os dados foram passados para kg/h utilizando 1,14 kg/m<sup>3</sup> como massa específica do nitrogênio, referente à temperatura de 21°C e pressão de 1,01 bar. A tabela 4.4 apresenta os dados citados.

Tabela 4.4: Configurações para as condições de vazão máxima e mínima

Condição	$D_{capilar}$ [mm]	$l_{capilar}$ [m]	$P_e$ [bar]	$Q_l$ [l/min]	$Q_m$ [kg/h]
Vazão mínima	0,63	3,25	8	3,47	0,237
Vazão máxima	1,40	1,40	2,7	12,29	0,840

A faixa de testes foi determinada abrangendo todas as aplicações. A tabela 4.5 resume as características dos capilares que serão utilizadas nos testes e a faixa de vazão a ser contemplada, a princípio. É importante comentar que o catálogo foi utilizado como uma base, e não representa exatamente todos sistemas que possam vir a ser testados no Laboratório Aplicação. Um bom exemplo é o de produtos protótipos, os

quais estão em fase de desenvolvimento e podem, por ventura, vir a utilizar capilares de diâmetro fora da faixa contemplada pelo catálogo, ainda que isso não seja comum.

Tabela 4.5: Faixa geral de testes dos capilares

$D_{capilar}$ [mm]	0,63 a 1,50
$l_{capilar}$ [m]	0,40 a 7,85
$Q_m$ [kg/h]	0,237 a 0,840

Com base na figura 4.5, as pressões absolutas recomendadas de acordo com as características dos capilares a serem testados são: 270 kPa (2,7 bar) 445 kPa (4,45 bar) e 800 kPa (8 bar).

Nota-se que a norma não contempla capilares com comprimento maior que 6 m. Entretanto, constata-se pelo catálogo de compressores que os capilares utilizados com comprimento superior a 6 m possuem diâmetro de no máximo 1 mm. Deste modo, fazendo-se uma extrapolação do diagrama, conclui-se que para tubos capilares nessa faixa (comprimento maior que 6 m e diâmetro menor que 1 mm) deve-se utilizar uma pressão absoluta de 800 kPa (8 bar).

#### 4.1.4: Análise Teórica dos Medidores

Verificou-se que ambos os medidores estão aptos, de acordo com a norma [4], a serem utilizados no aparato de medição de vazão em tubos capilares. A norma especifica que o elemento medidor de vazão mássica do aparato deve possuir uma incerteza de medição de, no máximo, 1% do valor medido. Como as incertezas combinadas do CMFS010 e do Mass 2100 são 0,35% e 0,60%, respectivamente, os dois equipamentos podem ser usados.

Na figura 4.6 é apresentado um gráfico mostrando as incertezas de medição de ambos fluxímetros para a faixa de interesse.

#### 4.1.5: Análise Prática dos Medidores

Após a validação teórica dos dois medidores, eles foram testados, com o intuito de analisar o seu desempenho na prática. Para realização dos testes, os equipamentos foram inseridos, separadamente, em série na bancada existente. Optou-se pela instalação individual dos medidores para evitar que um equipamento interferisse na

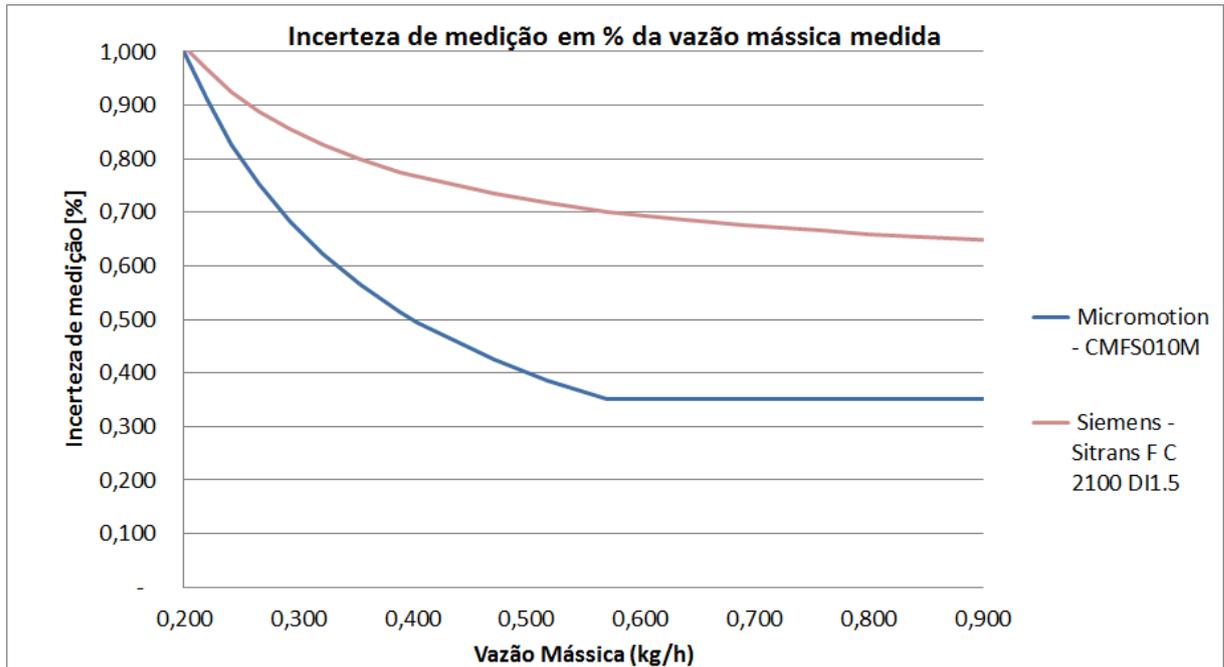


Figura 4.6: Incerteza de medição em % da vazão mássica medida dos medidores Mass 2100 e CMFS010M na faixa de interesse

medição do outro. Como descrito em 3.3, os medidores de vazão baseados no princípio Coriolis excitam o fluido com uma certa frequência, podendo a frequência imposta por um equipamento influenciar na medição do outro. No esquema da figura 3.3, eles apareceriam imediatamente antes do tubo capilar. A figura 4.7 mostra como eles foram acoplados à estrutura do aparato.

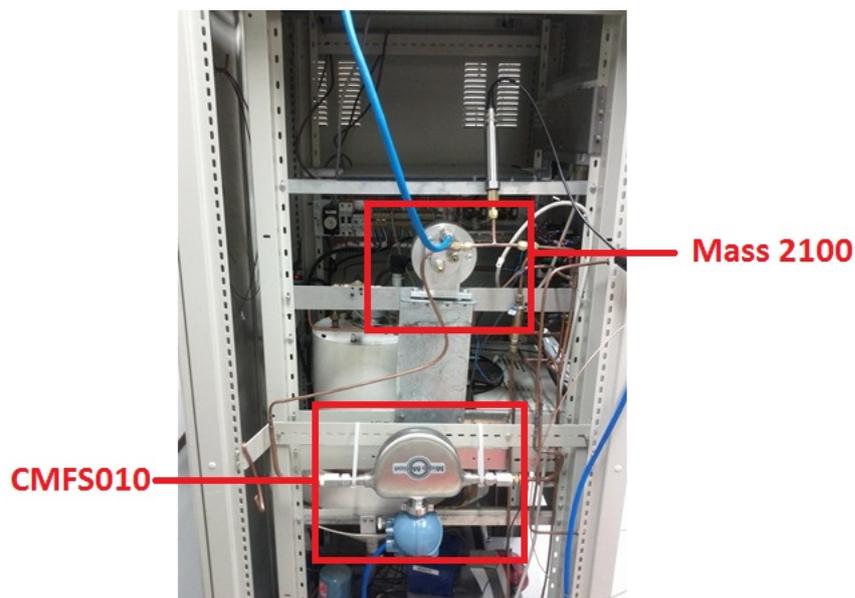


Figura 4.7: Medidores de vazão mássica acoplados ao aparato atual

#### 4.1.5.1: Escolha dos Capilares

A fim de que se pudesse testar os medidores em toda a faixa de vazões encontrada teoricamente, foram escolhidos capilares que contemplassem a gama de diâmetros mostrada na tabela 4.5. Visto que tanto o comprimento quanto o diâmetro do tubo influenciam na vazão de fluido através dele, foi determinado um valor fixo de comprimento (3 m), para que as vazões também acompanhassem a faixa da tabela. Três amostras de comprimentos diferentes de um capilar com diâmetro específico foram escolhidas para também avaliar a influência da variação do comprimento. Tubos capilares com diâmetro maior que 1,1 mm foram selecionados com comprimento de 5 m. Isso foi feito para limitar um pouco a vazão através dos mesmos e para que eles pudessem ser medidos pelo aparato existente, já que este apresenta problemas na medição de vazões relativamente altas. A tabela 4.6 contém a relação dos capilares que foram utilizados nos testes. A figura 4.8 apresenta as amostras utilizadas.

Tabela 4.6: Tubos capilares utilizados nos testes

<b>Amostra</b>	<b><math>D_{capilar}</math> [mm]</b>	<b><math>l_{capilar}</math> [m]</b>
1	0,518	3,00
2	0,53	3,00
3	0,61	3,00
4	0,642	3,00
5	0,70	3,00
6	0,79	3,00
7	0,83	3,00
8	0,91	3,00
9	0,92	3,00
10	1,07	1,00
11	1,07	3,00
12	1,07	5,00
13	1,37	5,00
14	1,63	5,00

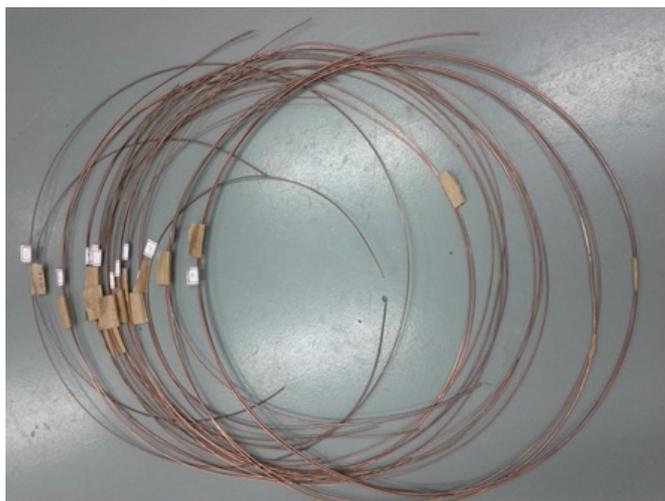


Figura 4.8: Amostras de tubos capilares utilizadas

#### 4.1.5.2: Testes Comparativos

Primeiramente foi testado o medidor da Siemens, Mass 2100. Ele foi inserido no aparato existente imediatamente antes do tubo capilar, fazendo com que o trajeto do nitrogênio no aparato se transformasse no seguinte:

*fonte de  $N_2$  → regulador de pressão → medidor de vazão mássica → tubo capilar → tanque de água.*

Foi então realizado um teste para cada um dos capilares anteriormente selecionados. A pressão aplicada foi a recomendada pela norma [4] e foram adquiridos os resultados das medições feitas pela bancada e pelo medidor. É importante comentar que a bancada realiza a medição fazendo o cálculo do deslocamento do volume de água no tempo, sendo o resultado da medição apresentado apenas ao final desse período. Já o medidor de vazão mássica mede instantaneamente a vazão, devendo o resultado ser lido a partir do momento em que o mostrador não apresentar mais flutuações. No entanto, devido às características do aparato existente, principalmente às necessidades de ajuste na pressão ao longo do teste para mantê-la constante, foi verificada uma flutuação na medição informada pelo medidor de vazão mássica mesmo após longos períodos. Na tentativa de minimizar o erro da medição, o valor do medidor de vazão mássica foi lido próximo do fim do teste.

Como o aparato existente traz o resultado da medição em l/min, esse valor foi transformado em kg/h para efeitos de comparação com o medidor tipo Coriolis. Esse procedimento será repetido ao longo do trabalho, sendo o resultado de medição da bancada sempre apresentado em termos de vazão mássica.

A incapacidade do regulador de pressão do aparato existente em manter a pressão do teste constante com pequena incerteza torna difícil a comparação dos dois medidores. Não se pode garantir que os ensaios de um mesmo tubo capilar foram realizados às mesmas condições nos dois medidores de vazão mássica, tendo em vista que os ensaios serão realizados separadamente. Em se tratando de vazões pequenas, como as observadas através dos tubos capilares, uma pequena variação na pressão resulta em uma alteração significativa na vazão. Buscando-se um parâmetro para comparação dos ensaios nos dois medidores, foi introduzido o valor teórico, cuja incerteza é desconhecida, porém no contexto do trabalho mostrou-se um bom parâmetro comparativo.

Na tabela 4.8 são mostrados os dados dos ensaios realizados com o medidor Mass 2100. A pressão informada ( $P_e$ ) refere-se à pressão na entrada do capilar média durante o teste e foi obtida através do sistema de aquisição da bancada. As duas últimas colunas apresentam o erro percentual absoluto dos resultados de medição do aparato atual e do medidor de vazão mássica em relação ao valor teórico.

Tabela 4.7: Dados dos ensaios realizados com medidor Mass 2100 introduzido na bancada atual

Amostra	$D_{capilar}$ [mm]	$l_{capilar}$ [m]	$P_e$ [bar]	Valor Teórico [kg/h]	$Q_m$ Bancada [kg/h]	$Q_m$ Mass 2100 [kg/h]	Erro Bancada [%]	Erro Mass 2100 [%]
1	0,518	3,00	8,00	0,1526	0,1332	0,1321	12,75	13,45
2	0,53	3,00	8,00	0,1616	0,1553	0,1569	3,95	2,93
3	0,61	3,00	8,00	0,2297	0,1960	0,1988	14,69	13,45
4	0,642	3,00	7,99	0,2607	0,2401	0,2461	7,89	5,59
5	0,70	3,00	7,99	0,3236	0,3071	0,3088	5,12	4,58
6	0,79	3,00	7,99	0,4379	0,4112	0,4146	6,08	5,31
7	0,83	3,00	8,00	0,4960	0,4823	0,4875	2,77	1,72
8	0,91	3,00	7,99	0,6236	0,5789	0,5895	7,16	5,46
9	0,92	3,00	7,99	0,6408	0,6307	0,6357	1,59	0,80
10	1,07	1,00	4,47	0,8896	0,7873	0,8517	11,50	4,26
11	1,07	3,00	8,03	0,9418	0,9743	0,9877	3,45	4,87
12	1,07	5,00	8,01	0,7294	0,7383	0,7458	1,23	2,25
13	1,37	5,00	4,53	0,7484	0,6783	0,6896	9,37	7,86
14	1,63	5,00	4,50	1,1475	1,0129	1,0020	11,73	12,68

Após os testes com o Mass 2100, ele foi desconectado do sistema e no seu lugar inserido o medidor CMFS010, mantendo-se a ordem dos elementos do sistema.

Os comentários relativos à realização dos ensaios com o medidor da Siemens valem também para esses testes com o medidor da Micro Motion. A tabela 4.8 apresenta os dados dos testes com esse medidor.

Tabela 4.8: Dados dos ensaios realizados com medidor CMFS010 introduzido na bancada atual

<b>Amostra</b>	$D_{capilar}$ [mm]	$l_{capilar}$ [m]	$P_e$ [bar]	<b>Valor Teórico</b> [kg/h]	$Q_m$ <b>Bancada</b> [kg/h]	$Q_m$ <b>CMFS010</b> [kg/h]	<b>Erro Bancada</b> [%]	<b>Erro CMFS010</b> [%]
1	0,518	3,00	8,00	0,1526	0,13179	0,1425	13,66	6,64
2	0,53	3,00	8,01	0,1618	0,15456	0,1611	4,49	0,45
3	0,61	3,00	8,00	0,2297	0,1932	0,2026	15,89	11,80
4	0,642	3,00	8,00	0,2610	0,24081	0,2500	7,74	4,22
5	0,70	3,00	8,00	0,3240	0,32154	0,3190	0,77	1,55
6	0,79	3,00	8,00	0,4384	0,42021	0,4250	4,16	3,06
7	0,83	3,00	7,99	0,4954	0,51888	0,4900	4,74	1,09
8	0,91	3,00	8,01	0,6252	0,58926	0,5905	5,74	5,54
9	0,92	3,00	8,00	0,6417	0,64584	0,6365	0,65	0,80
10	1,07	1,00	4,49	0,8938	0,8832	0,8640	1,18	3,33
11	1,07	3,00	7,99	0,9370	1,01844	0,9650	8,69	2,99
12	1,07	5,00	8,02	0,7303	0,76245	0,7483	4,40	2,47
13	1,37	5,00	4,53	0,7484	0,70863	0,7090	5,31	5,26
14	1,63	5,00	4,53	1,1556	1,10883	1,0400	4,05	10,00

Os resultados dos testes mostraram um erro de medição significativo tanto entre a bancada e os medidores de vazão mássica em relação ao valor teórico quanto entre os medidores e a bancada. Ressalta-se que não se conhece a incerteza do valor teórico e estima-se que o processo de medição e controle da pressão do aparato atual acrescenta uma boa dose de incerteza ao sistema como um todo. Entretanto, observou-se uma coerência nos resultados: os medidores de vazão apresentaram quase sempre um erro em relação ao valor teórico menor que a bancada e o medidor CMFS010 apresentou um erro menor que o Mass 2100, conforme esperado, já que o sensor da Micro Motion possui uma incerteza de medição de quase metade do valor do seu concorrente da Siemens. A comparação dos erros dos medidores em relação ao valor teórico pode ser melhor visualizada no gráfico da figura 4.9.

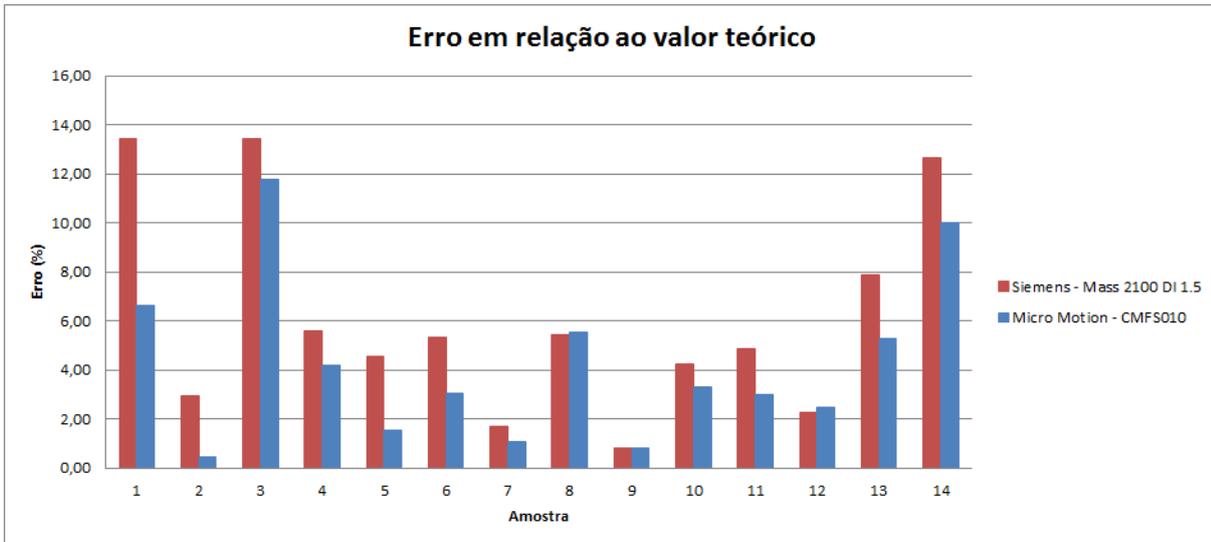


Figura 4.9: Erros de medição da bancada e dos medidores de vazão mássica em relação ao valor teórico em % absoluto

#### 4.1.6: Escolha do Medidor

Após análise teórica e prática verificou-se que os dois medidores estudados são aptos a serem utilizados no novo aparato de medição. Tanto o medidor da Micro Motion quanto o da Siemens apresentam incerteza menor do que a recomendada pela norma [4] e menor erro do que o aparato existente. No entanto, a comparação das especificações dos equipamentos mostrou que o medidor da Micro Motion, composto pelo sensor CMFS010M e o transmissor 1700, possui uma incerteza de medição para gases menor que a do seu concorrente da Siemens, formado pelo par Mass 2110 e Mass 6000. Os testes práticos mostraram que ambos medidores são aplicáveis na faixa de interesse e que o CMFS010 realmente possui menor erro de medição, função de sua melhor especificação de incerteza. Finalmente, foi realizada uma comparação dos preços de ambos equipamentos, e mais uma vez o medidor da Micro Motion revelou-se uma melhor escolha por apresentar um menor custo, conforme mostrado na tabela 4.9. Pelos motivos citados, o sensor CMFS010 e o transmissor 1700 da Micro Motion foram escolhidos para serem utilizados no novo aparato de medição.

## 4.2: Regulador de Pressão

Após a definição do medidor de vazão, buscou-se a definição de outro componente que também possuirá um papel central no novo aparato: o regulador de pressão.

Tabela 4.9: Comparação dos custos dos medidores em estudo

<b>Medidor (sensor + transmissor)</b>	<b>Custo [R\$]</b>
Micro Motion CMFS010M + 1700	28 000,00
Siemens Mass 2100 DI 1.5 + Mass 6000	36 000,00

Esse elemento fará o ajuste da pressão durante o teste, principal condição a ser levada em conta em um teste de medição de vazão de um fluido. O principal objetivo de um regulador é manter a pressão constante em um lado do regulador, mesmo que haja uma pressão diferente ou flutuante no outro lado. Quando a pressão é controlada à jusante do controlador, um regulador redutor de pressão deve ser utilizado.

A escolha adequada do regulador de pressão exige que pelo menos três variáveis sejam conhecidas: a pressão de entrada, a pressão de operação e a capacidade a ser exigida da válvula. Os dois primeiros parâmetros são facilmente determináveis na aplicação em questão, sendo a pressão de entrada a fornecida pelo cilindro do nitrogênio (aproximadamente 10 bar) e a pressão de operação determinada pela norma [4] (até 8 bar absoluto). Já a determinação do último, capacidade da válvula, é um pouco mais complexa e é normalmente realizado através do cálculo do  $C_v$ .

Por definição,  $C_v$  é a quantidade de água a 60 °F (20 °C) medida em galões, que passa por uma válvula totalmente aberta em um minuto, com uma perda de carga de 1 psig (0,069 bar). Basicamente, é um índice de capacidade utilizado para estimar de o tamanho de uma restrição necessária em um sistema de fluido.

Mesmo que a utilização do  $C_v$  no dimensionamento de válvulas seja feita por todos os fabricantes, as equações para o seu cálculo podem diferir um pouco de fabricante para fabricante. No presente trabalho, foram utilizadas as recomendações da Swagelok<sup>®</sup>, pelo histórico de utilização das válvulas e do método pelo Laboratório Aplicação.

#### 4.2.1: Cálculo do $C_v$

Cálculos de vazão para fluidos gasosos são um pouco mais complexos que os para líquidos, devido ao fato de os gases serem fluidos compressíveis e sua densidade

mudar em função da pressão. Além da queda de pressão entre a entrada e saída da válvula ( $\Delta p$ ), duas outras condições devem ser consideradas no cálculo da vazão para gases: baixa queda de pressão e alta queda de pressão.

As ilustrações na figura 4.10 mostram as diferenças entre  $p_1$  (pressão de entrada) e  $p_2$  (pressão de saída), nas diversas condições de vazão.

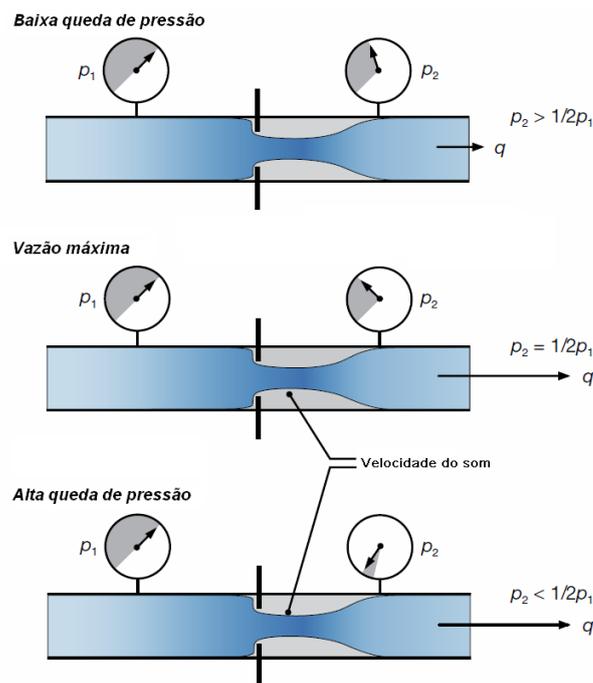


Figura 4.10: Influência do diferencial de pressão na vazão de fluidos gasosos

Na condição de baixa queda de pressão, quando a pressão de saída  $p_2$  é maior que metade do valor da pressão de entrada  $p_1$ , a pressão de saída restringe a vazão através do orifício. Com o declínio da pressão de saída, a vazão aumenta, aumentando também a velocidade do gás deixando o orifício.

Quando a pressão decai até metade da pressão de entrada, o gás sai do orifício à velocidade do som. Como o gás não pode exceder a velocidade do som, ele atingiu sua velocidade máxima, condição essa chamada de condição de vazão crítica. Qualquer queda na pressão de saída a partir desse ponto, mesmo que a pressão de saída seja reduzida a zero, não causará aumento na vazão. Deste modo, quando há alta queda de pressão a vazão depende apenas da pressão de entrada, sendo independente da pressão de saída.

A equação a ser utilizada em situações de baixa queda de pressão é

$$C_v = \frac{3Q_l}{N_2(3p_1 - 2\Delta p)} \sqrt{\frac{p_1 G_g T_1}{\Delta p}}, \quad (4.4)$$

onde:

$Q_l$  é a vazão em l/min,

$p_1$  é a pressão de entrada em bar,

$G_g$  é a gravidade específica do gás,

$T_1$  é a temperatura à montante em K,

$\Delta p$  é a queda de pressão ( $p_1 - p_2$ ),

$N_2$  é uma constante referente às unidades utilizadas .

A equação para alta queda de pressão é mais simples, visto que depende somente da pressão de entrada, temperatura, vazão e gravidade específica do gás.

$$C_v = \frac{Q_l}{0,471 N_2 p_1} \sqrt{G_g T_1} \quad (4.5)$$

Pretende-se calcular a capacidade que a válvula deverá possuir ( $C_v$  da válvula) para que opere com bom desempenho mesmo no fim da faixa de aplicação em que ela será utilizada. Deste modo, o  $C_v$  deve ser calculado para a condição de vazão máxima. O estudo da faixa de vazões de aplicação, resumido na tabela 4.4, indica que a vazão máxima a ser utilizada será de 0,840 kg/h, a uma pressão de 2,7 bar. Sabe-se que essa é uma faixa base e que pode vir a ser extrapolada, ainda que a maioria dos sistemas lidados pelo laboratório utilizem uma vazão bem distante desse limite. Assim, optou-se por aplicar um coeficiente de segurança de 20%, resultando em uma vazão máxima de 1 kg/h. É importante comentar que esse valor é inferior ao observado nos testes realizados para comparação dos medidores (tabelas 4.7 e 4.8), já que as condições dos ensaio foram propositalmente escolhidas para extrapolar a faixa de aplicação e analisar o comportamento dos medidores de maneira mais ampla.

Para utilizar a equação do  $C_v$  adequada, deve-se analisar se haverá uma alta ou baixa queda de pressão na válvula reguladora de pressão na condição de vazão máxima. A pressão de entrada ( $p_1$ ), será a proveniente do cilindro de nitrogênio, sendo de cerca de 10 bar. A pressão na saída na saída do regulador de pressão ( $p_2$ ), a ser aplicada na entrada do tubo capilar, é de 2,7 bar. Isso implica em  $p_2 < 0,5p_1$  o que se encaixa na condição de alta queda de pressão, devendo ser utilizada a equação 4.5 no cálculo do  $C_v$ .

A vazão mássica definida foi transformada em vazão volumétrica, a fim de poder ser utilizada com a equação 4.5. A tabela 4.10 mostra os dados utilizados no cálculo do  $C_v$  desejado.

Tabela 4.10: Cálculo do  $C_v$  da válvula reguladora de pressão

Fluido	$N_2$
Gravidade específica do fluido	$G_g$ 0,967
Temperatura do fluido [K]	$T_1$ 294,15 (21°C)
Pressão na entrada da válvula [bar]	$P_1$ 10
Vazão a 21°C e 1,01 bar [l/min]	$Q_l$ 14,14 (1 kg/h)
Constante numérica para as unidades l/min, bar e K	$N_2$ 6950
<b>Coefficiente de vazão da válvula (vazão crítica)</b>	<b><math>C_v</math> 0,0073</b>

Esse resultado torna evidente o motivo de o regulador de pressão utilizado na bancada atual apresentar um mau desempenho. Ele foi superdimensionado, já que possui um  $C_v$  de 0,135. Ainda, deve-se levar em conta que o cálculo do  $C_v$  realizado foi baseado nas necessidades do Laboratório Aplicação e sabe-se que o Laboratório Tribologia, detentor da bancada, tem como faixa de aplicação ainda menor.

#### 4.2.2: Escolha do Regulador de Pressão

Após o cálculo do  $C_v$ , deve-se escolher um regulador que possua uma capacidade de vazão superior a obtida teoricamente ( $C_v$  da válvula maior que o  $C_v$  calculado), para garantir seu funcionamento adequado. Também devem ser levadas em conta a pressão na entrada da válvula e a pressão de controle.

Como já comentado, pelo histórico de utilização na empresa e disponibilidade de equipamentos para teste, optou-se por iniciar a tarefa de busca de um regulador compatível pela fabricante Swagelok®. O regulador com menor  $C_v$  encontrado é da série KPR e possui  $C_v=0,02$ .

Os fabricantes normalmente disponibilizam múltiplas curvas de vazão para o mesmo regulador a diferentes pressões de entrada, com o intuito de informar a faixa de operação dos reguladores. Na figura 4.11, são mostradas as curvas de vazão para o regulador inicialmente selecionado. Foi destacada na imagem a faixa na qual o regulador será utilizado baseando-se nas seguintes características:

- pressão de entrada de até 34,4 bar (pressão nominal de 10 bar);
- pressão de controle de até 17,2 bar (faixa nominal de 2,7 bar a 8 bar);
- vazão de nitrogênio menor que 20 l/min, (vazão máxima estimada de 14,14 l/min).

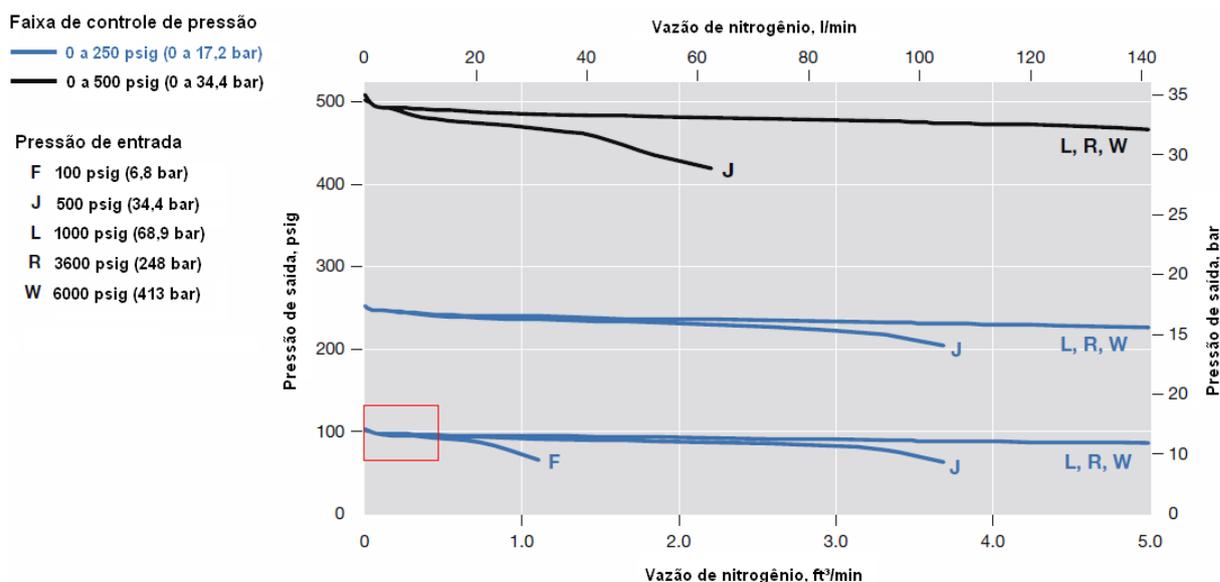


Figura 4.11: Curvas de vazão para o regulador Swagelok série KPR com Coeficiente de vazão 0,02

Os parâmetros acima citados remetem à escolha da curva J na figura 4.11 como a mais adequada. Nota-se que ela possui uma inclinação quase imperceptível na faixa desejada, representando uma boa capacidade de manter a pressão a jusante em um valor fixo, característica ideal para os testes os quais se deseja realizar. Dentre outros parâmetros, como portas de conexão e tipo manopla, os quais foram dispensados de serem citados no presente documento, chegou-se ao seguinte modelo de válvula: Swagelok KPR1GIA411A70000. A figura 4.12 traz o regulador em estudo.

Houve a oportunidade de se testar um regulador bem similar ao especificado, com a única diferença de possuir uma maior faixa de controle de pressão, (0 a 34,4) bar ao invés de (0 a 17,2) bar. Foi realizada uma série de testes para verificar a capacidade do regulador em manter a sua pressão de saída constante dada uma determinada pressão de entrada. Sabe-se que mesmo regulando uma fonte de nitrogênio, como um cilindro, para fornecer o fluido a uma pressão fixa, haverá uma variação na pressão. Conforme o gás sai do cilindro a pressão no seu interior cai, sendo a função do regulador de pressão compensar essa queda e impedir que ela ou outras eventuais flutuações sejam sentidas à jusante do dispositivo.



Figura 4.12: Regulador de pressão Swagelok série KPR

Os testes foram realizados ligando-se uma fonte de nitrogênio ao regulador de pressão. Na saída desse último foi conectado um tubo capilar, para promover a queda da pressão disponibilizada pelo cilindro até a atmosférica. Entre eles foi instalado um transmissor de pressão. O transmissor utilizado é da fabricante Velki, com faixa de medição de (0 a 10) bar e incerteza combinada de 0,005 % do fundo de escala. Foi realizada a aquisição dos dados de pressão do transmissor via comunicação RS-485 e utilização de um software em linguagem Labview. Os detalhes dessa comunicação serão descritos no capítulo 6. A figura 4.13 mostra o transmissor de pressão utilizado e a figura 4.14 a montagem dos elementos para a realização do teste.



Figura 4.13: Transmissor de pressão Velki

Na figura 4.15, é mostrado o resultado de um dos testes realizados. Fixou-se a pressão fornecida pelo cilindro de nitrogênio em um valor superior a 8 bar. Após isso, ajustou-se a manopla do regulador de pressão até que a pressão na linha atingisse exatamente 8 bar. A escolha dessa condição de pressão para ser apresentada se deu por ser a mais utilizada nos testes do laboratório. A aquisição de dados foi rodada por

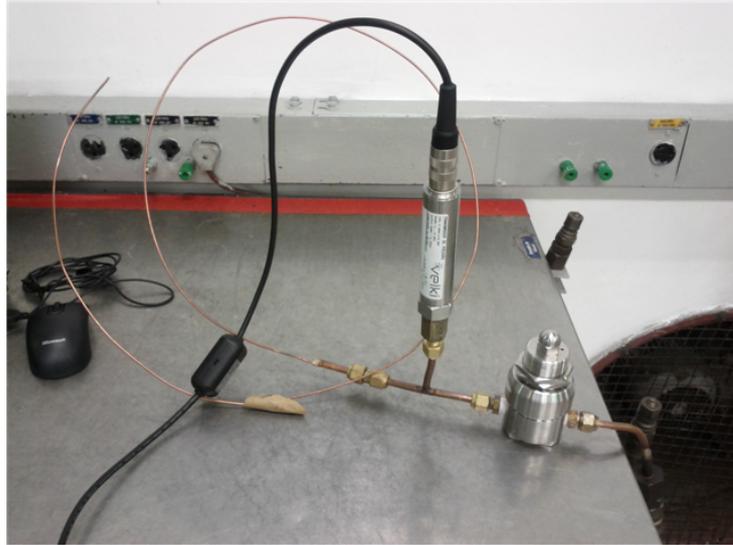


Figura 4.14: Teste com regulador de pressão

cerca de 5 min para análise da variação da pressão.

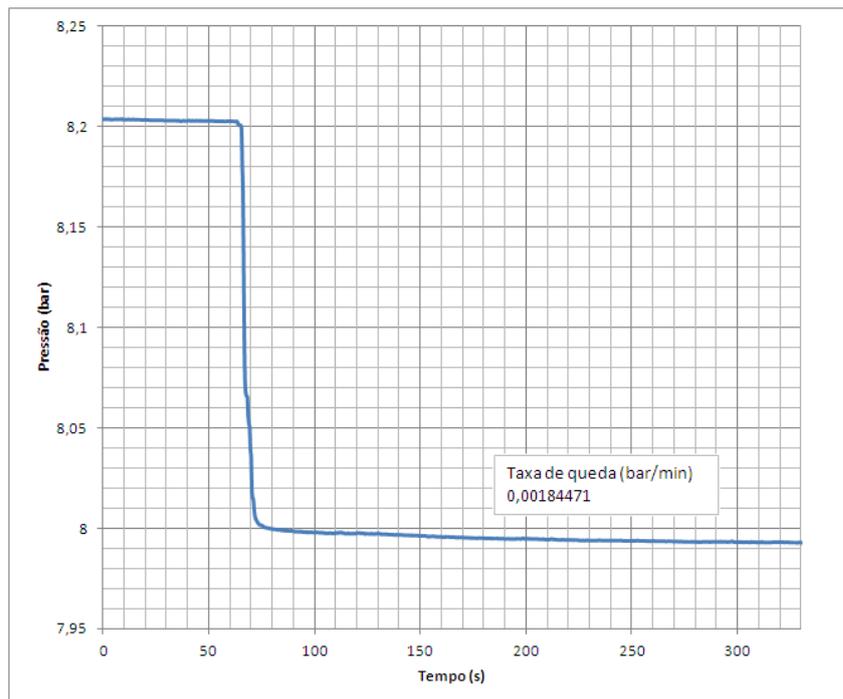


Figura 4.15: Resultado de um dos testes com o regulador de pressão

A norma [4] especifica que o regulador de pressão do aparato deve ser capaz de manter a pressão durante o teste constante, dentro de uma faixa de  $\pm 5\%$  ou  $\pm 0,07$  bar, o que for menor. Na condição do teste realizado isso equivale a  $\pm 0,4$  bar ou  $\pm 0,07$  bar. Levando em conta o resultado do teste do regulador, que revelou uma taxa de queda de pressão de aproximadamente 0,002 bar/min, e que um capilar medido com o aparato atual leva em média 6 min, ter-se-ia uma variação na pressão de

aproximadamente 0,012 bar, valor dentro da faixa especificada pela norma. Deve-se salientar, ainda, que a duração dos testes com os medidores de vazão mássica é consideravelmente menor, o que implicará em uma variação de pressão durante o teste ainda menor.

O regulador de pressão também foi testado na condição de operação considerada mais crítica para o seu funcionamento, quando é aplicado o maior diferencial de pressão entre a sua entrada e a saída. Essa condição equivale à pressão de teste de 2,7 bar (saída do regulador), sendo aplicado à sua entrada a pressão máxima vinda do cilindro de nitrogênio, aproximadamente 10 bar. A figura 4.16 ilustra o resultado do teste realizado. Com a válvula de pressão do cilindro totalmente aberta, ajustou-se a manopla do regulador até que a pressão da linha alcançasse, aproximadamente, 2,7 bar (atingiu-se 2,7040 bar). Então o sistema foi deixado livre e foi feita aquisição de dados por cerca de 15 min.

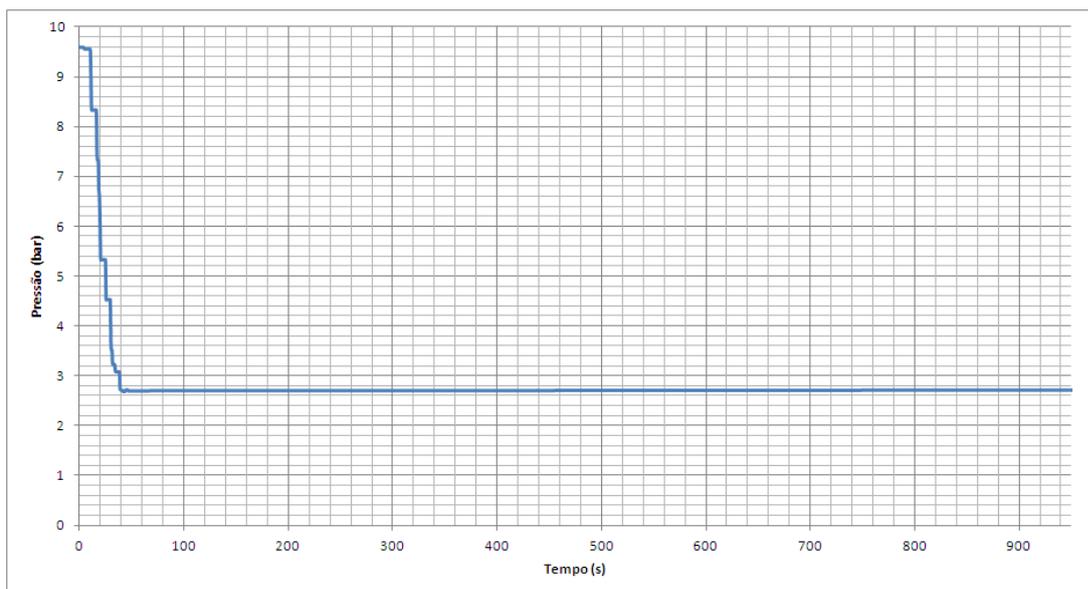


Figura 4.16: Teste com regulador de pressão - condição de 2,7 bar

No gráfico da figura 4.17 é mostrado com mais detalhes o comportamento da pressão durante o teste. Foram plotadas duas linhas horizontais representando os limites inferior e superior dentro dos quais a pressão deve permanecer de acordo com a norma (2,63 bar a 2,77 bar). Nota-se que o regulador manteve a pressão constante com boa exatidão e bem longe dos limites estabelecidos pela norma.

Destaca-se que nesse teste foi verificado um aumento da pressão ao longo do procedimento, enquanto no ensaio à condição de 8 bar houve um declínio. Isso deve-se ao fato de que no primeiro teste a pressão controlada à jusante da válvula

era de 8 bar, bem próxima da pressão sendo fornecida pelo cilindro (8,2 bar), sendo a queda de pressão no interior do cilindro sentida no regulador de pressão. Já no último ensaio, a pressão foi regulada para 2,7 bar, quando o cilindro fornecia uma pressão de aproximadamente 10 bar. Desse modo, a queda de pressão no interior do cilindro é imperceptível e o maior esforço da válvula é no sentido de manter o diferencial de pressão entre a fonte e a pressão controlada à jusante do regulador. A válvula reguladora de pressão testada apresentou um bom desempenho em ambas as situações.

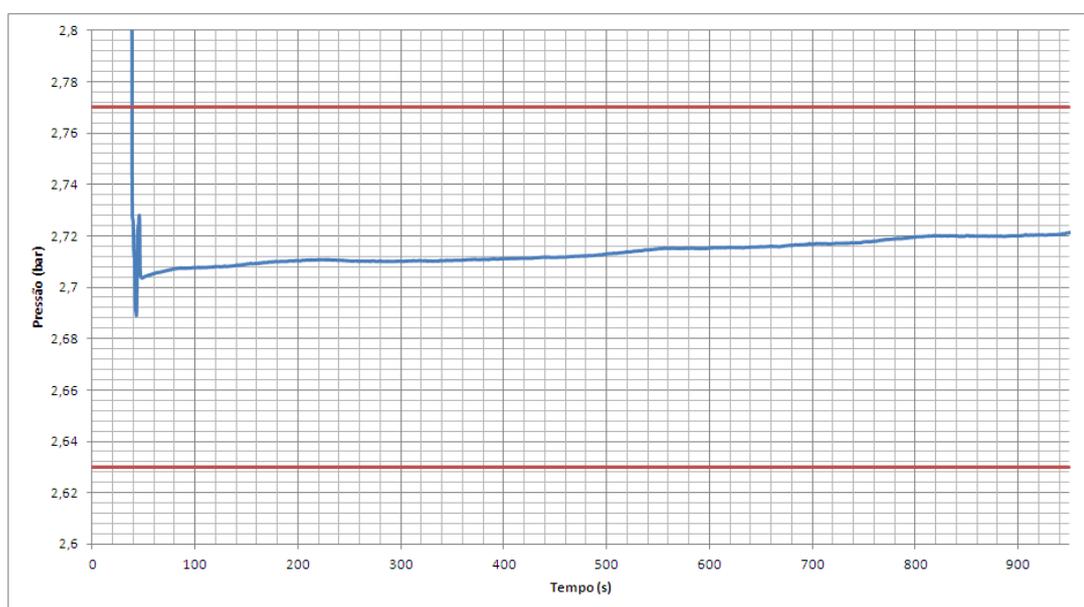


Figura 4.17: Ampliação da figura 4.16 para uma melhor visualização dos detalhes do teste à condição de 2,7 bar com destaque para os limites da pressão do teste recomendados pela norma

### 4.2.3: Considerações Finais

O presente capítulo mostrou como foi feita a escolha dos equipamentos que realizarão as funções elementares na nova bancada de medição de vazão em tubos capilares. O medidor de vazão mássica da fabricante Micro Motion foi definido como o dispositivo responsável pela medição de vazão após ter sido feita a análise das especificações e da realização de testes comparativos entre ele e outro equipamento da fabricante Siemens. Também foi determinado o regulador de pressão a ser utilizado, outro elemento base do novo aparato de medição. Após o cálculo do coeficiente de vazão da válvula ( $C_v$ ) e tomando-se por base as condições de pressão a serem utilizadas nos testes de medição de vazão de capilares, chegou-se a um modelo de válvula

reguladora de pressão ideal. Houve a oportunidade de se testar um modelo de regulador bastante similar ao especificado, obtendo-se resultados bastante satisfatórios. Esse fato fez com que o regulador de pressão da Swagelok fosse considerado apto e escolhido para ser utilizado no aparato de medição de vazão.

## **5 Projeto**

Até esta etapa, preocupou-se em analisar e testar os equipamentos a serem utilizados no aparato individualmente. Os dispositivos foram selecionados buscando atingir o melhor desempenho possível dentro das especificações feitas pela norma [4] e da faixa de operação desejável para a bancada. Com os equipamentos principais determinados, passa-se a pensar no modo como o aparato experimental, como um todo, irá funcionar. O presente capítulo tem o objetivo de descrever como ficarão dispostos os elementos do sistema que se está propondo e como será a interação entre os mesmos para que se atinja os objetivos traçados no capítulo 1.

### **5.1: Introdução**

Como comentado na seção 3.4, a norma regulamentadora de testes para medição de vazão em tubos capilares especifica dois métodos de teste com diferentes aparatos. O método utilizado no desenvolvimento do presente trabalho é o alternativo, o qual é baseado no uso de equipamentos eletrônicos.

O método alternativo recomenda que o aparato contenha, além da linha principal, uma linha secundária provida de um regulador de baixa pressão. O objetivo é que, em testes nos quais seja requerida uma pressão menor que 4,45 bar, o nitrogênio utilize a passagem secundária para que seja feito um ajuste fino da pressão do teste.

Entretanto, segundo mostrado na seção 4.2.2, o regulador de pressão escolhido garante as condições de teste requeridas pela norma mesmo para baixas pressões. Também há de se levar em consideração o histórico do laboratório, o qual indica que a quase totalidade dos sistemas testados em suas câmaras possuem capilar com diâmetro entre 0,6 mm e 0,9 mm, além de comprimento maior que 2,5 m. Como pode ser verificado na figura 4.5, tubos capilares com tais características requerem, em quase todas as configurações, uma pressão absoluta de teste de 800 kPa (8 bar). O bom

desempenho do regulador, juntamente com a pequena demanda de medição de capilares a baixas pressões torna desnecessária a presença de um caminho secundário no aparato de medição. A figura 5.1 mostra um esquema do novo aparato de teste.

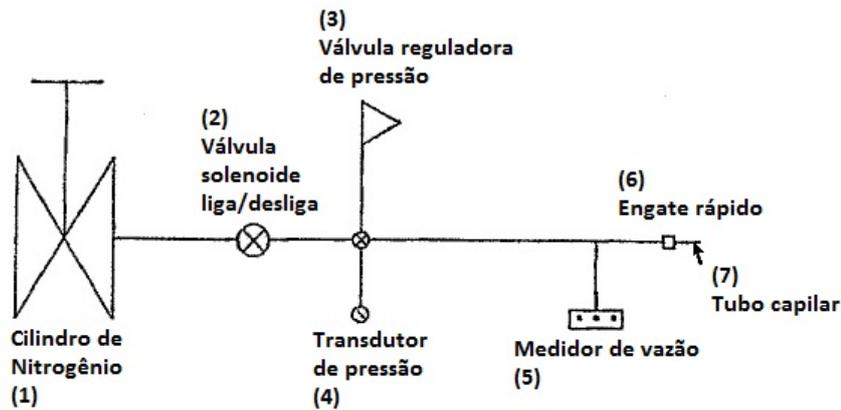


Figura 5.1: Esquema do novo aparato de teste baseado no método alternativo da norma

## 5.2: Versões do Projeto

A finalidade geral deste trabalho é projetar um aparato para medição de vazão em tubos capilares. Ou, mais precisamente, pode ser resumido em: escolha dos equipamentos e definição de como eles serão conectados e dispostos de modo a formar o novo aparato. O laboratório tinha o objetivo de que fosse feita a especificação dos componentes de modo a ter o orçamento aprovado até o fim do primeiro semestre de 2012, para que no segundo semestre fosse feita a compra e montagem dos equipamentos. Isso impossibilita que seja feita a análise do aparato como um todo, já que essa segunda etapa só será realizada após o término do presente trabalho.

Também é importante destacar que o aparato tem a necessidade de ser portátil, por isso deve agregar o menor número de componentes possível, desde que isso não comprometa o seu desempenho. Basicamente, ele deve apresentar como resultado um único valor de vazão ao final do teste, o que pode ser insuficiente para uma análise mais detalhada do funcionamento e desempenho do aparato ao longo dos ensaios de medição de vazão.

Com base no que foi dito, houve a necessidade de se dividir o projeto em dois, sendo uma versão de desenvolvimento e uma versão final. A versão de desenvolvimento tem por objetivo realizar testes com o medidor de vazão escolhido monitorando-

se algumas das variáveis do processo por meio de aquisição de dados. A versão final apresentará o *layout* do aparato de medição, com os equipamentos adequados para conferir maior simplicidade de uso ao mesmo. Ambas versões possuem softwares para interface com o usuário compatíveis com o nível de interação necessária.

## 5.2.1: Versão de Desenvolvimento

### 5.2.1.1: Equipamentos

Na etapa de comparação dos medidores de vazão, para testar os dois equipamentos estudados, eles foram inseridos na bancada existente. O resultado da medição era obtido por inspeção visual do transmissor do medidor de vazão. Como o valor informado pelo *display* do transmissor oscilava consideravelmente durante todo o teste, sabia-se que o resultado da medição continha uma parcela de erro significativa. Supunha-se que essa variação constante na vazão era ocasionada pela pressão do teste, que não era controlada com grande eficiência pelo regulador de pressão instalado. Baseado nisso, viu-se a necessidade de monitorar essas variáveis durante o teste, para que se pudesse ter uma melhor ideia do comportamento do sistema.

A bancada atual já realiza a medição contínua da pressão em dois pontos: dentro do tanque de água e na entrada do capilar (depois do regulador de pressão). Essa última é a que se deseja obter. Entretanto, não é possível ter acesso a essa informação, visto que o software utilizado para a medição não grava esse dado em arquivo, apenas o disponibiliza em um gráfico ao longo do tempo. Também deve-se levar em consideração que os transdutores de pressão utilizados na bancada não são regularmente recalibrados, desde a confecção da mesma, em 2001. Por isso, foi instalado um novo transmissor de pressão no aparato, colocado logo após transmissor de pressão da bancada. O novo dispositivo instalado é da fabricante Velki e tem faixa nominal de (0 a 10) bar, é o mesmo utilizado nos testes do regulador de pressão, descrito na seção 4.2.2. A figura mostra o transmissor de pressão instalado na bancada.

Os dados de vazão foram adquiridos por intermédio do transmissor do medidor de vazão mássica, do qual também foi possível obter a leitura da temperatura do fluido. É importante comentar que, como dito na seção 5.1, o laboratório deseja que o resultado da medição seja apresentado em litros por minuto. Em alguns medidores de vazão mássica, como os estudados neste trabalho, há a opção de que o resultado seja apresentado como vazão mássica (kg/h) ou vazão volumétrica (l/min). Isso se deve ao



Figura 5.2: Novo transmissor de pressão instalado no aparato atual

fato de esses equipamentos serem capazes de medir também a densidade do fluido que os percorre. No entanto, nos dois equipamentos que se testou, esse atributo só estava disponível para a medição de fluidos líquidos, o que não é o caso do presente trabalho.

A solução encontrada foi a de se fazer a aquisição da vazão mássica e convertê-la via software para vazão volumétrica. Como o dado deve ser apresentado à condição padrão de temperatura e pressão ( $20^{\circ}\text{C}$  e  $1,01\text{ bar}$ ), por meio de uma álgebra simples e do conhecimento da massa específica do nitrogênio nessa condição, é possível realizar a conversão da vazão mássica para a volumétrica. Ao contrário da conversão de  $\text{l/min}$  para  $\text{kg/h}$ , na qual é necessário que se conheça a massa específica do fluido no momento do teste, a conversão de  $\text{kg/h}$  para  $\text{l/min}$  é mais simples, pois requer a massa específica do fluido à condição desejada. Enquanto a primeira exige que se conheça a temperatura e a pressão do teste, implicando em medição dessas variáveis, a segunda não requer medições extras. Basta que se saiba a massa específica do fluido à condição desejada.

#### 5.2.1.2: Interface com o Usuário

A comunicação, tanto com o transmissor de pressão quanto com o medidor de vazão mássica, foi realizada via protocolo de comunicação Modbus e será descrita no capítulo 6. Por hora destaca-se a interface gráfica (ver figura 5.3) do software gerado para a versão de desenvolvimento do projeto.

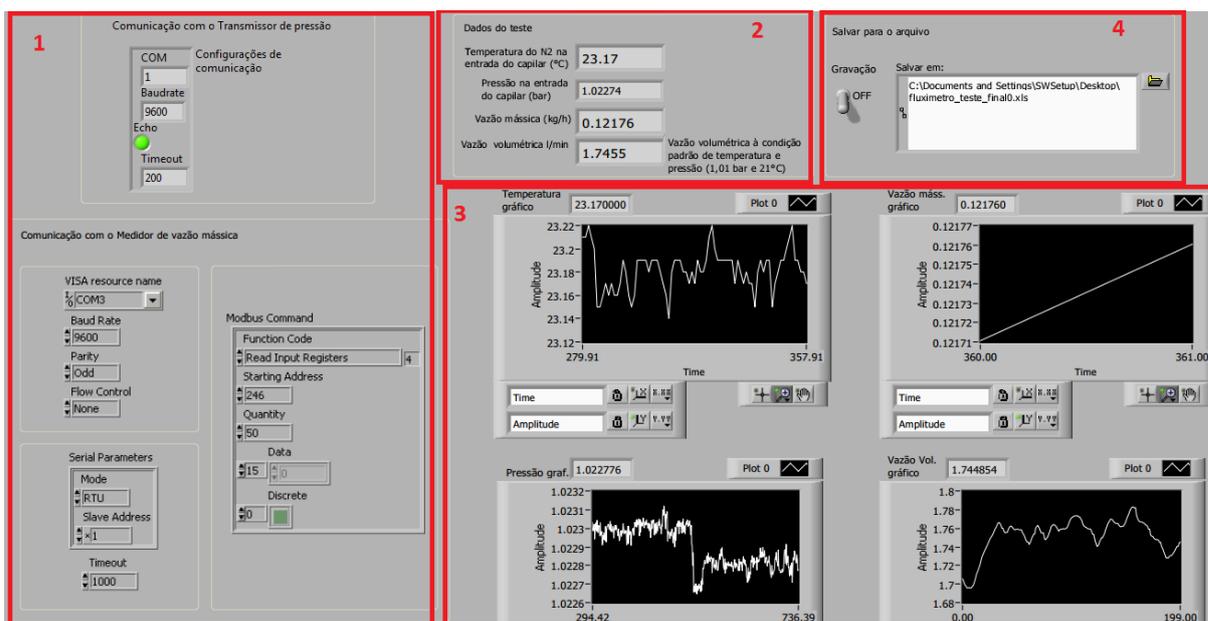


Figura 5.3: Painel frontal da versão de desenvolvimento

A interface com o usuário mostrada na figura 5.3 foi dividida em quatro zonas para facilitar a sua descrição. Em 1 são informados os principais parâmetros de configuração da comunicação com o transmissor de pressão e com o medidor de vazão mássica, os quais serão melhor descritos no capítulo seguinte. O retângulo 2 mostra as variáveis que são monitoradas pelo programa: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e pressão (bar) na entrada do capilar, vazão mássica (kg/h) e vazão volumétrica equivalente na condição padrão (l/min), sendo as três primeiras medidas e a última calculada. Destacado em 3 estão os gráficos referentes às variáveis citadas em 2, que são plotadas no decorrer do tempo. Eles servem para dar ao usuário um melhor entendimento do comportamento do sistema ao longo do teste. Por fim, há a possibilidade de se armazenar os dados que estão sendo lidos em um arquivo, função destacada em 4. A partir da escolha de um diretório e da ativação da chave “Gravação”, o software inicia o armazenamento das variáveis e após o desligamento da chave gera um arquivo do Excel com as mesmas. Um arquivo típico gerado é mostrado na figura 5.4.

### 5.2.2: Versão Final

O objetivo da versão de desenvolvimento é o de monitorar as variáveis chave do atual sistema de medição de vazão em tubos capilares, fazendo-se algumas alterações no mesmo para tentar prever o comportamento do novo sistema, cujo aparato ainda será montado. Com isso pode-se ter uma boa noção de como será o desem-

	A	B	C	D	E
1	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Vazão Mássica (kg/h)	Vazão Volumétrica (l/min)
2	0	23,28	1,022359	0,000000	0,000000
3	1	23,28	1,022332	0,000000	0,000000
4	2	23,30	6,744344	0,000000	0,000000
5	3	23,31	7,998547	0,000000	0,000000
6	4	23,33	8,079473	0,000000	0,000000
7	5	23,35	8,087355	0,084189	0,000000
8	6	23,35	8,084536	0,115715	1,208130
9	7	23,36	8,078722	0,147307	1,660530
10	8	23,37	8,071911	0,178199	2,113881
11	9	23,37	8,064769	0,207777	2,557180
12	10	23,35	8,057625	0,235706	2,981625
13	11	23,35	8,051187	0,235706	3,382408
14	12	23,33	8,044956	0,286148	3,382406
15	13	23,34	8,038968	0,308393	4,106253
16	14	23,32	8,033515	0,328969	4,425466
17	15	23,32	8,028759	0,348364	4,720734
18	16	23,35	8,024094	0,365907	4,999043
19	17	23,37	8,019843	0,382053	5,250788

Figura 5.4: Arquivo típico gerado com a gravação dos dados monitorados pelo programa

penho do novo aparato experimental. Já a versão final deve ser mais simples, executando apenas as funções estritamente necessárias para que a medição seja adequada e facilitando a sua utilização pelo usuário final, que será um técnico em refrigeração.

### 5.2.2.1: Equipamentos

Esta versão será a utilizada no cotidiano do laboratório e deve atender às características apresentadas na seção 1.3 do capítulo introdutório. É interessante citá-las novamente para que possa ser feita uma análise de cada item até o presente momento do projeto e justificados os passos seguintes. As características desejáveis para o aparato são as seguintes:

- estar de acordo com a devida norma [4];
- apresentar uma faixa de medição que abranja os capilares utilizados na empresa;
- apresentar maior velocidade de medição em comparação com a bancada atual;
- ser mais compacto e possuir maior portabilidade;
- fazer o controle automático da pressão de teste (opcional);

- ser mais sustentável.

Como pôde ser constatado em todas as etapas do projeto até aqui, cada equipamento escolhido e cada passo tomado foram baseados primeiramente nas especificações da norma, buscando um melhor desempenho que o recomendado quando possível. A faixa de medição foi obtida a partir dos capilares utilizados nas aplicações da empresa. A maior velocidade de medição será conferida pela utilização de um equipamento (medidor de vazão mássica) que realiza a medição de vazão instantaneamente, não sendo o valor calculado como uma média ao longo do tempo, como é feito na bancada atual. Esse fator também conferirá uma maior sustentabilidade ao novo aparato em relação ao atual, já que não será utilizada água na medição.

O controle automático da pressão não foi realizado no presente projeto por alguns motivos. O principal deles deve-se ao fato de os ensaios realizados com a bancada atual serem relativamente longos e de o regulador pressão não ter sido escolhido apropriadamente, o que torna necessário o constante ajuste da válvula durante todo o teste e faz surgir a necessidade de um controle automático da pressão. No entanto, como a nova bancada utilizará um regulador de pressão mais adequado à aplicação, espera-se que não sejam necessários ajustes na válvula durante a realização dos testes. Outro fator a ser considerado é que, como será mostrado no capítulo 7, o tempo de um teste com o novo aparato será consideravelmente menor em comparação ao atual, reduzindo a chance de a pressão variar o suficiente para atingir um patamar fora da norma e requerer ajuste. Ou seja, o controle automático da pressão será realizado pelo regulador de pressão.

Resta-se comentar a respeito da portabilidade. Aqui há dois aspectos a serem levados em consideração: a busca por um aparato experimental que seja compacto e que informe a vazão em litros por minuto. Já foi comentada a incapacidade do medidor de vazão mássica em medir vazão volumétrica diretamente na condição padrão. Para contornar esse fator, poderiam ser acoplados um computador portátil e um sistema de aquisição de dados ao aparato, utilizando um software para realizar a conversão entre as unidades, similar ao que foi feito na versão de desenvolvimento. Porém, isso aumentaria o tamanho da bancada, além de implicar em um considerável aumento no custo total do aparato. Com isso, chegou-se à conclusão que esse equipamento extra é dispensável e que a transformação da unidade de vazão pode ser feita separadamente sem grandes problemas. O usuário realiza o teste, anota o a vazão mássica obtida, e depois a converte para vazão volumétrica no seu escritório de trabalho. Um

software para auxiliá-lo nessa tarefa foi desenvolvido e será mostrado mais adiante.

Tendo em vista que nessa versão não será realizada a aquisição dos dados, deve-se substituir o transmissor de pressão por um outro equipamento que possua um mostrador, para que seja possível o monitoramento da pressão durante a realização dos testes. Foi escolhido um manômetro digital da fabricante Velki, com faixa de medição de (-1 a +30) bar e incerteza combinada de 0,1% do fundo de escala. A escolha desse equipamento se deu pelo histórico do laboratório em trabalhar com tal fabricante e de o dispositivo apresentar um incerteza de medição suficientemente baixa – a norma [4] recomenda que o elemento medidor de pressão tenha uma incerteza de medição menor que 0,2% do fundo de escala. A figura 5.5 mostra o equipamento selecionado.



Figura 5.5: Manômetro digital selecionado para medir pressão no novo aparato experimental

A bancada também contará com uma válvula solenoide, a qual será o primeiro elemento por onde o nitrogênio vindo do cilindro passará. Ela funcionará normalmente fechada, abrindo quando for energizada por meio de uma chave seletora (liga/desliga). Tem o objetivo de confiar mais segurança ao aparato, permitindo que a tubulação da bancada seja isolada da fonte de nitrogênio quando necessário. A figura 5.6 ilustra uma válvula solenoide de duas vias, como a que será utilizada no aparato.

### 5.2.2.2: Modelo 3D

Com base nos equipamentos escolhidos para serem utilizados na versão final da bancada, foi proposto um modelo 3D de como ficará o aparato experimental depois



Figura 5.6: Válvula solenoide de duas vias

de pronto. O modelo mostrado na figura 5.7 foca na estrutura que servirá de base para montagem dos dispositivos, delimitando os espaços que cada elemento ocupará. Os componentes foram numerados de acordo com o esquema da figura 5.1, tendo sido representados os seguinte componentes:

1. conexão para a fonte de nitrogênio;
2. válvula solenoide liga/desliga;
3. regulador de pressão;
4. manômetro digital;
5. medidor de vazão mássica;
  - (a) sensor do medidor de vazão mássica;
  - (b) transmissor do medidor de vazão mássica;
6. conexão para o tubo capilar.

### 5.2.2.3: Interface com o Usuário

Como já comentado, o novo aparato não realiza aquisição nem processamento de dados, portanto também não há nenhum programa interagindo diretamente com a bancada. O que se fez foi desenvolver um software em Labview para facilitar ao usuário a tarefa de conversão do dado obtido do aparato: vazão mássica em vazão volumétrica. O programa é simples e intuitivo, bastando o usuário inserir um valor

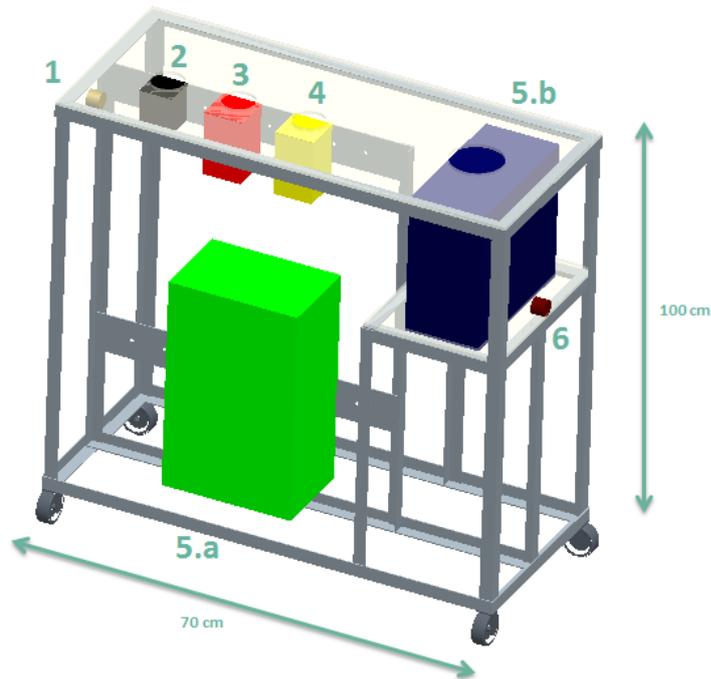


Figura 5.7: Modelo 3D da montagem final na bancada

de vazão em kg/h para que seja obtida a vazão correspondente em l/min à condição padrão de temperatura e pressão. A figura 5.8 mostra a interface do programa citado.

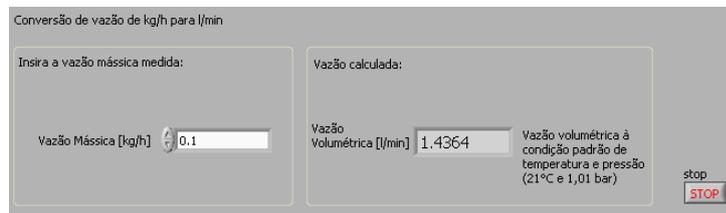


Figura 5.8: Painel frontal da versão final

### 5.3: Considerações Finais

No presente capítulo foram descritas as duas versões do projetos propostas para que o aparato experimental final atenda às especificações desejadas. A primeira versão descrita, a de desenvolvimento, tem por objetivo tentar prever o desempenho da bancada que será construída. Essa versão consiste em realizar o monitoramento das principais variáveis em um teste de medição de vazão em tubos capilares para que se obtenha um melhor entendimento do sistema, possibilitando uma melhor análise do seu comportamento. Já a versão final consiste em mostrar como estarão configurados os equipamentos presentes na bancada após sua montagem, justificando a escolha

destes com base nas características desejáveis do aparato de medição



## **6 Implementação**

O presente trabalho trata apenas do projeto do aparato experimental, ficando a montagem efetiva fora da sua abrangência, como já comentado no capítulo 5. Desta forma, este capítulo aborda quase que exclusivamente a versão de desenvolvimento do projeto, em torno da qual se trabalhou o projeto como um todo e onde houve a implementação de equipamentos e software de fato. A respeito da versão final, serão feitos apenas alguns comentários sobre o programa disponibilizado para ser usado em conjunto com a bancada após sua conclusão.

### **6.1: Versão de Desenvolvimento**

O desenvolvimento tecnológico tem proporcionado um grande avanço no setor industrial, trazendo dispositivos cada vez mais versáteis e com melhor desempenho. A introdução de microprocessadores em transmissores tem permitido a configuração dos equipamentos de medição de acordo com cada aplicação e o acesso às variáveis de processo, além das funções elementares do transmissor. O uso e o estabelecimento da comunicação com dois desses chamados transmissores inteligentes revelou-se um dos pontos chave deste trabalho.

Esse tipo de transmissor possui, além da saída analógica comumente fornecida pelos transmissores usuais, uma saída digital. Através dela se tem acesso à variável já processada, na unidade desejada (bar, kPa, kg/h, etc), ao contrário da saída analógica, da qual se obtém um valor de tensão (V) ou corrente (A) proporcional ao que está sendo medido. Os transmissores inteligentes oferecem ganho mesmo quando se utiliza a saída analógica, visto que permitem a configuração da sua faixa de medição. Por exemplo, ao se utilizar um transmissor de pressão com faixa nominal de medição (0 a 10) bar em uma aplicação que abranja pressões de (0 a 1) bar, pode-se configurar o transmissor para possuir fundo de escala de (0 a 1) bar. Desse modo, os limites

inferior e superior da saída analógica (4 mA a 20 mA, por exemplo) passarão a ser, respectivamente, 0 bar e 1 bar (e não mais 0 bar e 10 bar), aumentando-se a resolução do equipamento de medição. Em uma atividade paralela ao desenvolvimento do presente projeto, realizou-se a calibração de transmissores de pressão como o utilizado neste trabalho, na qual puderam ser comprovadas as características citadas.

Essas funcionalidades extras dos transmissores inteligentes proporcionam praticidade no manuseio dos dados a serem lidos desses dispositivos, já que uma vez determinadas as suas configurações elas ficarão armazenadas na própria eletrônica do dispositivo, possibilitando ao usuário ter um acesso transparente à variável de processo desejada. Além do acesso às variáveis medidas, a comunicação com o transmissor de pressão facilitou a calibração do mesmo, como já comentado, através da redefinição dos parâmetros de zero e ganho do dispositivo. Em se tratando do transmissor de vazão mássica foi possível alterar o parâmetro de *cut-off*, valor de vazão abaixo do qual o medidor entende a vazão medida como zero. A mudança do valor de *cut-off* só é permitida via comunicação com o transmissor do equipamento (não é alterável via *display*) e permitiu que o equipamento fosse capaz de medir vazões bem pequenas, contemplando toda a faixa de operação desejada. A comunicação com ambos os transmissores se deu por meio do protocolo Modbus.

### **6.1.1: Comunicação Modbus/RS-485**

O padrão Modbus foi um dos primeiros protocolos desenvolvidos para comunicação entre dispositivos no meio industrial. Foi publicado em 1979 pela MODICON como uma interface de comunicação em rede ponto-multiponto, baseado numa arquitetura mestre/escravo. Nessa arquitetura, um dispositivo denominado mestre, envia mensagens (*dataframes*) para um ou mais escravos da rede através de linhas seriais. Essas mensagens podem conter solicitações de leitura de dados e comandos com dados de escrita. Ao receber esses comandos, o escravo envia mensagens de resposta com os dados solicitados, confirmações ou códigos de erro. Por ser um protocolo aberto, simples e fácil de implementar, não só é utilizado até hoje como é o meio de comunicação entre dispositivos eletrônicos na indústria mais comum [12].

Tanto o transmissor de pressão quanto o transmissor do medidor de vazão mássica implementam o padrão Modbus, tendo sido esse o protocolo usado para a interação com os equipamentos. Para a conexão física foi utilizado o padrão serial RS-485, suportado por ambos os equipamentos e bastante utilizado por garantir boa imunidade

a interferências e estrutura de barramento flexível.

A comunicação com os transmissores foi feita por um computador portátil, que no entanto, não possuía portas seriais. Para que pudessem ser utilizadas as suas portas USB, a solução encontrada foi utilizar conversores RS-485 ↔ USB, os quais emulam portas seriais no PC. Na aquisição do transmissor de pressão utilizado, foi obtido junto um conversor desse tipo, fornecido pela própria fabricante dos componentes do dispositivo. A sua vantagem é que ele já vem pronto para ser utilizado, com a devida conexão para o transmissor em uma extremidade e conexão USB na outra. A figura 6.1 mostra o conversor citado.



Figura 6.1: Conversor USB ↔ RS-485 K-104 conectado ao transmissor de pressão

Para realizar a comunicação com o transmissor do medidor de vazão foi usado um conversor genérico da fabricante Novus, o USB-i485 (ver figura 6.2). Utilizou-se a RS-485 com dois fios, ou seja, em modo *half-duplex* (pode haver transmissão nos dois sentidos, porém não simultaneamente). Esse é o mesmo tipo de comunicação implementado no conversor do transmissor de pressão.

Como comentado, uma das características pela qual o Modbus é bastante utilizado é o fato de permitir a conexão de múltiplos dispositivos (escravos) paralelamente, no mesmo barramento, a um dispositivo mestre. No entanto, neste trabalho eles foram conectados individualmente, pelo fato de o transmissor de pressão possuir um conversor USB/RS-485 específico, facilitando a conexão ao transmissor. A figura 6.3 mostra um esquema da rede que foi criada para a aquisição das variáveis de processo desejadas.



Figura 6.2: Conversor USB ↔ RS-485/RS-422 USB-i485

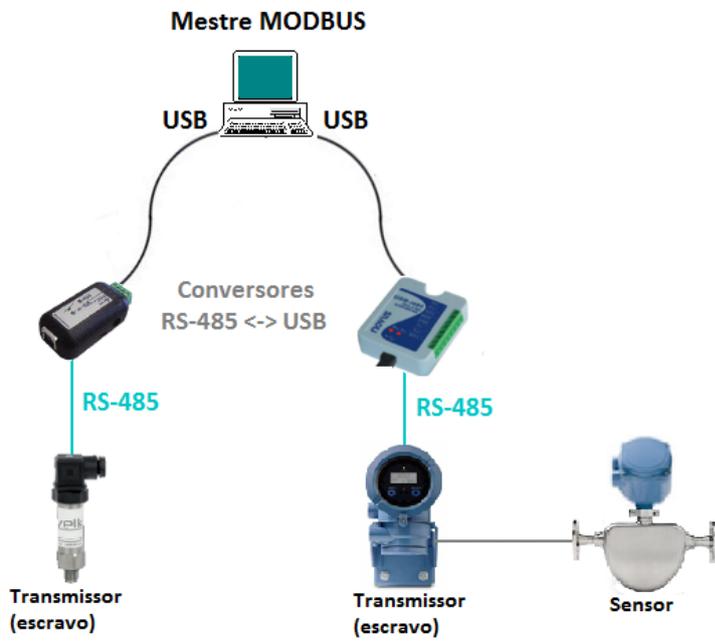


Figura 6.3: Esquema da rede criada para comunicação com os dispositivos de medição

## 6.1.2: Software Labview

Definidos o protocolo de comunicação e a camada física, resta a implementação em si do padrão e o processamento dos dados a serem adquiridos. Para tal finalidade foi gerado um software em Labview - um ambiente de desenvolvimento de sistemas que utiliza a linguagem visual G da *National Instruments*.

A programação em Labview é feita utilizando-se blocos que executam funções determinadas, cabendo ao usuário combiná-los para que realizem a função desejada. Por ser simples e ao mesmo tempo bastante versátil, Labview é bastante difundido seja no meio de pesquisa e desenvolvimento ou no industrial, com diversos fabricantes disponibilizando blocos de programação prontos, específicos para a comunicação com seus produtos. Outro ponto de destaque na programação com esse software é a facilidade de geração de interfaces gráficas para o usuário, que pode ser montada a partir de mostradores, gráficos e botões já pré-concebidos. A parte gráfica e principalmente o suporte dos fabricantes ao Labview foram os fatores determinantes na escolha desse ambiente de programação para ser utilizado no presente trabalho. O programa criado para a versão de desenvolvimento do projeto pode ser visto na figura 6.4.

A comunicação com o transmissor de pressão foi facilitada pelo fato de o fabricante do equipamento disponibilizar uma biblioteca dll (S30c.dll) para ser usada com seus dispositivos. Ela lida com a comunicação através das COMPorts seriais do computador e é utilizável com várias linguagens de programação no Windows. A comunicação com o transmissor do medidor de vazão mássica foi um pouco mais trabalhosa, visto que não há nenhuma biblioteca específica para ser utilizada com os dispositivos da Micro Motion. Foi, então, utilizada a biblioteca de Modbus para Labview da própria *National Instruments*.

## 6.1.3: Detalhamento do Programa

No primeiro bloco do programa são configuradas as variáveis necessárias ao estabelecimento da comunicação com os transmissores. Para o transmissor de pressão são definidas: a COMPort a qual o dispositivo foi conectado; a taxa de transmissão, que pode ser 9600 ou 115200; *Echo*, o qual se refere a um filtro que deve ser habilitado quando for utilizada conversão RS-485/USB; e *timeout*, o limite de tempo de espera da conexão em ms.

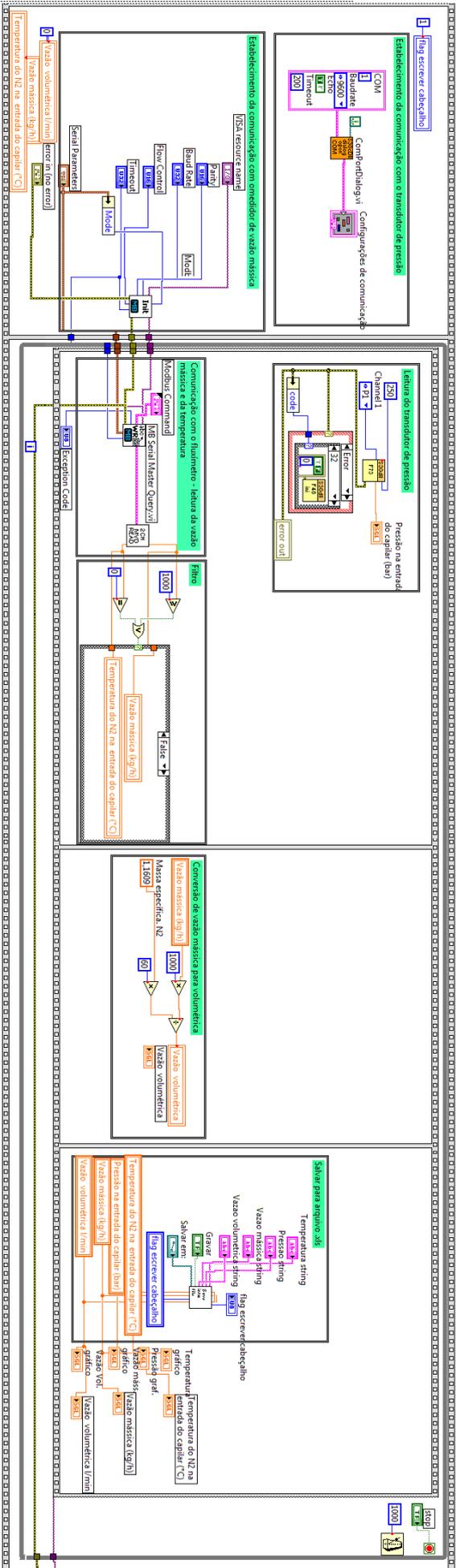


Figura 6.4: Programa em Labview para a versão de desenvolvimento do projeto

Na comunicação com o transmissor do medidor de vazão é utilizada a arquitetura VISA (*Virtual Instrument System Architecture*). VISA é um padrão para sistemas de instrumentação que realiza a interface entre hardware e o ambiente de desenvolvimento, fazendo as chamadas de driver apropriadas ao tipo de instrumento em uso e evitando a necessidade de se conhecer o protocolo de comunicação de cada dispositivo. Neste caso, permite que se selecione e utilize uma porta de comunicação (hardware) de maneira transparente ao programador. Também são definidos os parâmetros taxa de transmissão, paridade, controle de fluxo e *timeout*, cujos valores padrão são 9600, paridade ímpar, sem controle de fluxo de dados e 1000 ms de *timeout*, respectivamente. Fora esse último, é importante que os outros parâmetros sejam configurados da mesma maneira no transmissor, o que pode ser feito através do próprio mostrador do dispositivo. Também é necessário ser definido o tipo de Modbus, RTU (8 bits) ou ASCII (7 bits). Novamente, o mais importante é que esse parâmetro esteja configurado igual no transmissor. Os parâmetros citados são, então, usados para inicializar a porta serial (bloco “MB Init”).

Em seguida, entra-se no laço de controle, onde as variáveis são lidas a cada intervalo de 1 segundo. Na parte do transmissor de pressão são utilizadas duas funções da biblioteca S30c.dll: F48 e F73. A primeira é uma rotina de inicialização, que deve ser rodada sempre que o dispositivo for inicializado ou após uma interrupção na alimentação do mesmo. A função F73 faz a leitura de um determinado canal (neste caso a pressão absoluta), recebendo como parâmetros o endereço e o canal que deve ser lido do dispositivo.

O transmissor do medidor de vazão utiliza o bloco “MB Serial Master Query” da biblioteca Modbus para obter os registradores que devem ser lidos do escravo. Essa função recebe como um de seus parâmetros um comando Modbus, composto por um código de função e uma referência a um endereço na memória do transmissor, que pode conter valores que representem variáveis de processo ou configurações do próprio transmissor. Nesta etapa é usada a função “Read Input Registers”, responsável por obter o valor dos registradores de entrada do escravo. Os dados lidos dos registradores (valores hexadecimais) são então convertidos para números de ponto flutuante, obtendo-se as variáveis nos formatos desejados. No caso, temperatura em °C e vazão em kg/h. A conversão de hexadecimal para ponto flutuante é feita de acordo com um padrão IEEE<sup>1</sup>, que foge ao escopo do presente trabalho.

---

<sup>1</sup>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou IEEE é uma organização profissional sem fins lucrativos, fundada nos Estados Unidos e com filiais em muitas partes do mundo. Um de seus papéis

Durante o funcionamento do programa foi observada uma falha na conexão com o transmissor, fato repetido esporadicamente. Nessa situação, a leitura da temperatura cai a zero e a da vazão atinge um valor da ordem de  $10^{20}$ . Como a frequência ocorrência dessa falha é pequena e não foram encontrados erros nas configurações de comunicação que justificassem as falhas, foi optado por inserir um filtro. A sua implementação é bastante simples: quando um dos padrões de erro ocorre a leitura é desconsiderada e mantido o último valor adquirido. Observou-se que o filtro realizou com sucesso a função esperada, sem comprometer a aquisição dos dados, já que a taxa de ocorrência dos erros é pequena.

Na sequência do programa há a conversão da vazão mássica para volumétrica, feita utilizando-se a massa específica do  $N_2$  à condição padrão de temperatura e pressão. Finalmente, é criado, em um endereço escolhido pelo usuário, um arquivo do Excel com as seguintes variáveis: tempo, temperatura na entrada do capilar, pressão na entrada do capilar, vazão mássica e vazão volumétrica. Nota-se no programa, que é inserido um cabeçalho com o nome das variáveis no início do arquivo.

## 6.2: Versão Final

Como já comentado, no aparato experimental final não haverá aquisição das variáveis do processo por meio de software, por conseguinte não existirá processamento de dados. O que se fez foi implementar um programa bastante simples, com uma entrada e uma saída, que auxilie o usuário da bancada em seu estágio final. O software se resume à parte de conversão de vazão em kg/h para l/min do programa da versão de desenvolvimento. A figura 6.5 ilustra o diagrama de blocos do programa gerado.

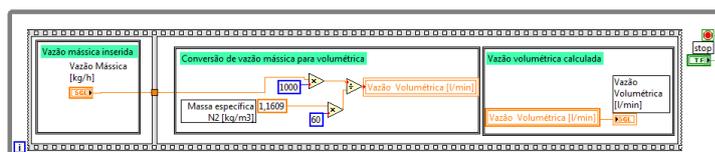


Figura 6.5: Programa em Labview para a versão final do projeto

### **6.3: Considerações Finais**

Este capítulo descreveu como foi realizada a implementação da versão de desenvolvimento do projeto. Foram tratados os padrões utilizados na comunicação com o transmissor de pressão e o transmissor do medidor de vazão mássica, bem como descrito o software em Labview desenvolvido para a aquisição e processamento das variáveis de interesse. Também foi apresentado, no fim do capítulo, um programa gerado para auxiliar o usuário da bancada final na conversão da vazão mássica para volumétrica.



## **7 Resultados**

O objetivo geral deste trabalho é o projeto de uma bancada portátil para medir vazão em tubos capilares. Dentro desse contexto, o alvo principal está na especificação dos componentes que vão compô-la. Como a montagem da bancada encontra-se além do planejamento deste projeto, não é possível que seja realizado o teste e a avaliação do aparato final. Apesar disso, chegou-se à conclusão que pode-se ter uma boa ideia do desempenho do aparato que está para ser construído fazendo-se algumas alterações na bancada atual e monitorando-se com mais detalhe algumas variáveis do processo.

### **7.1: Testes**

Após a inserção do medidor de vazão mássica e do transmissor de pressão na bancada atual, foram refeitos os testes realizados na etapa de comparação dos medidores de vazão mássica. O objetivo, além da tentativa de análise do aparato que será construído, é fazer uma melhor análise da bancada atual e das conclusões tiradas após a primeira bateria de testes.

Ressalta-se aqui uma mudança na maneira de se realizar os testes. O ajuste da pressão de teste em ensaios com a bancada atual é feito tendo com referência o valor mostrado pelo software da bancada, o qual faz a leitura de um transmissor de pressão do próprio aparato. Devido à maior confiabilidade e precisão do novo transmissor de pressão instalado em relação ao já presente na bancada, o ajuste da pressão de teste passou a ser com base nesse novo dispositivo. As figuras 7.1 e 7.2 mostram o comportamento da vazão mássica durante cada um dos 14 ensaios.

Nota-se que nos capilares de diâmetro menor, principalmente nas amostras de 1 a 3, há uma variação maior no perfil de vazão. Isso se deve ao controle da pressão durante o teste. À medida que o nitrogênio deixa o cilindro, decai a pressão

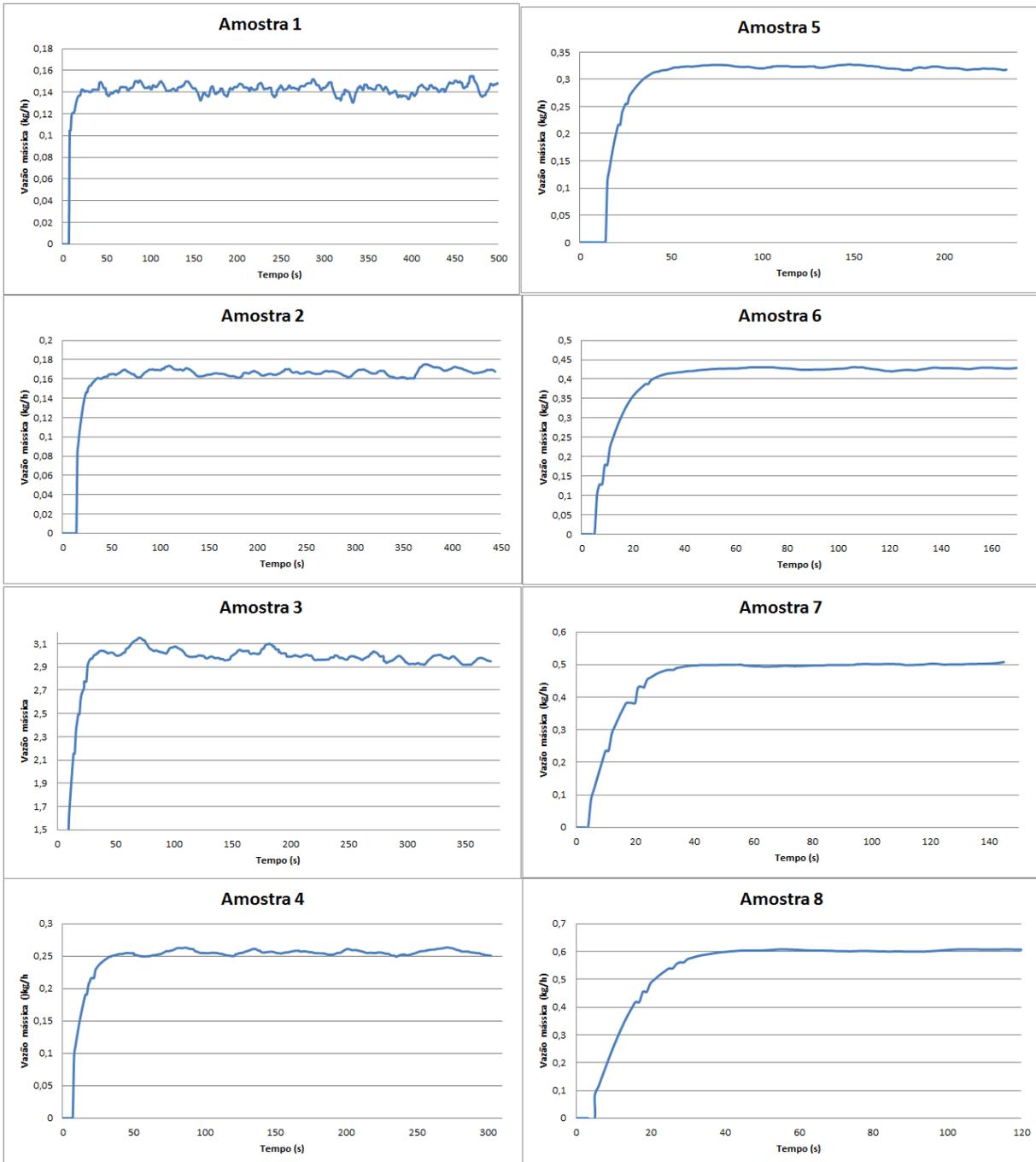


Figura 7.1: Ensaios de medição de vazão realizados com as amostras de tubos capilares 1 a 8

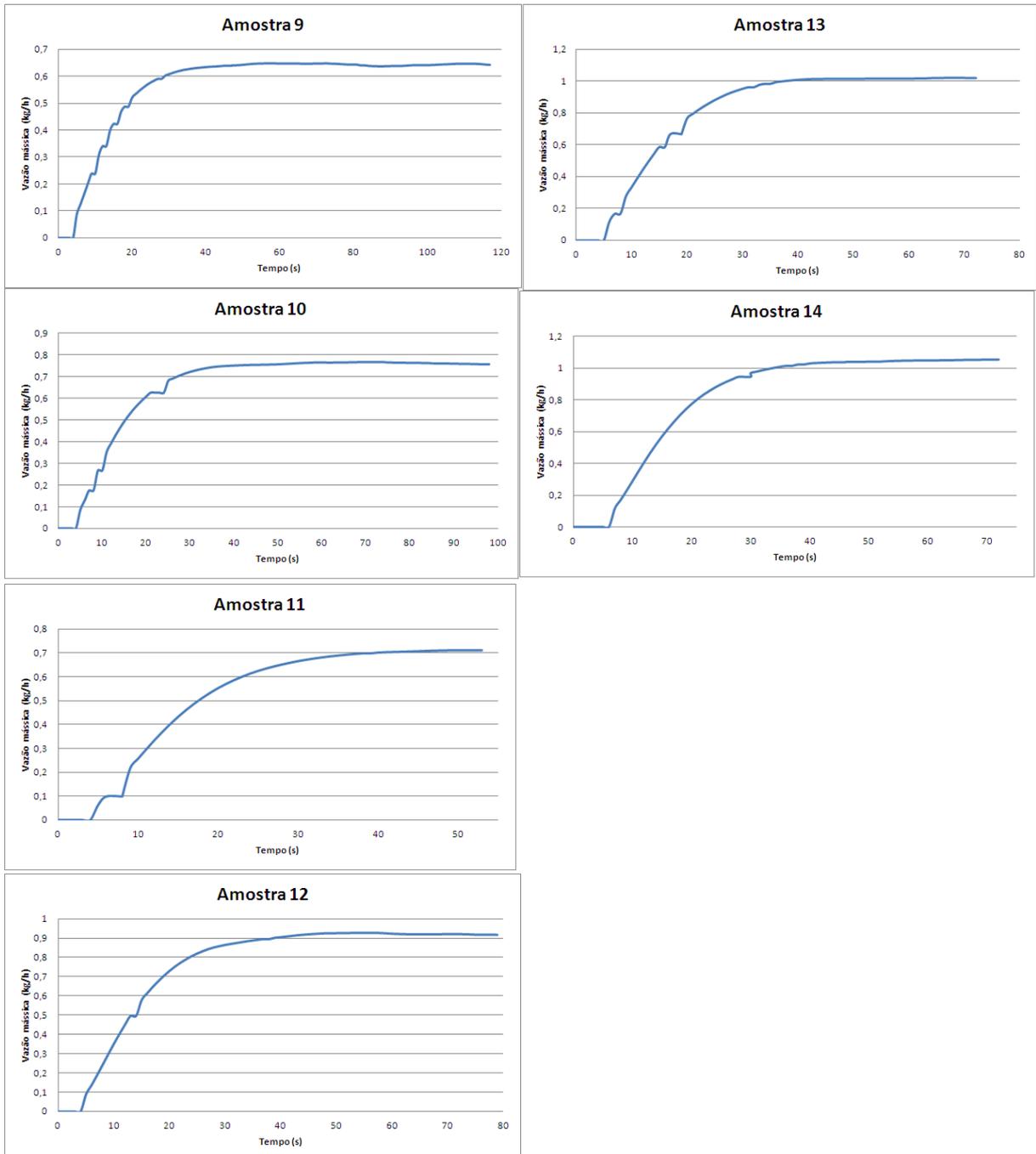


Figura 7.2: Ensaio de medição de vazão realizados com as amostras de tubos capilares 9 a 14

no seu interior e a tendência é que a pressão do teste decaia também. O regulador de pressão, sendo um dispositivo realimentado, age no sentido de minimizar essa queda. No entanto, variações significativas na pressão requerem um ajuste manual do regulador. Ressalta-se o fato de que a válvula reguladora de pressão da bancada foi superdimensionada, potencializando essas flutuações. O que ocorre, então, é que à medida que a pressão do teste diminui, a válvula é ajustada no sentido de restringir a vazão, aumentando assim a pressão. Essa tentativa de manter a pressão do teste constante, dentro do que especifica a norma, implica em uma variação considerável na vazão ao longo do tubo. Quanto menor o diâmetro interno do tubo capilar, maior é o impacto da variação da pressão na vazão no capilar.

Deve ser comentado que a bancada a ser montada contará com um regulador de pressão diferente do que equipa o aparato atual, e que, como mostrado nos testes do capítulo 4.2, deve apresentar um desempenho consideravelmente superior. Espera-se que ele seja capaz de manter a pressão de teste constante durante os ensaios de medição sem a necessidade de ajustes na manopla da válvula, o que implicaria em vazões com muito menos flutuações. É importante dizer que, apesar das perturbações causadas na vazão, o regulador de pressão da bancada manteve com sucesso as pressões de teste dentro do valor especificado pela norma. Lembra-se também que a regulagem da pressão foi feita tomando-se como referência o valor medido pelo transmissor de pressão adicional que foi instalado na bancada, o que facilitou o controle por este apresentar uma menor incerteza. Na figura 7.3 são mostrados em detalhes os perfis de vazão e pressão do ensaio realizado com a amostra 7.

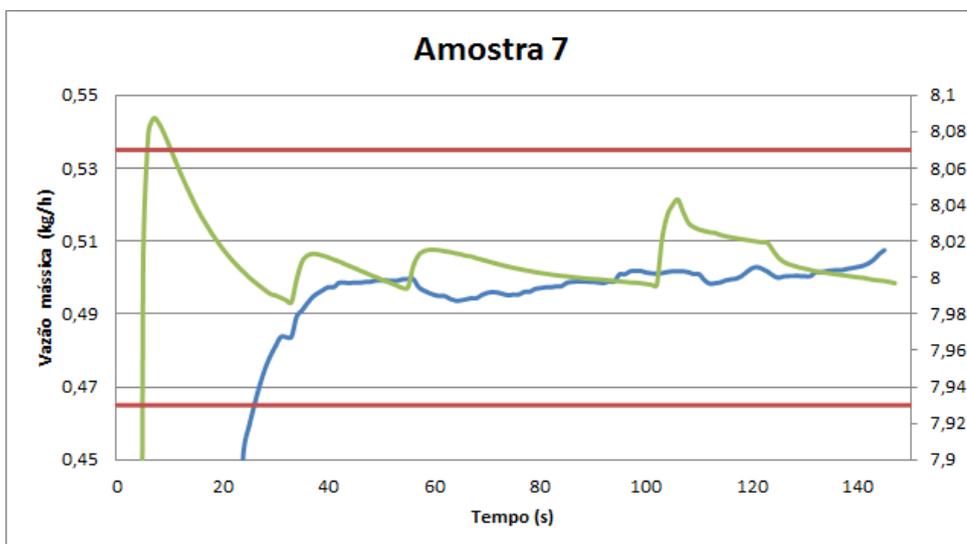


Figura 7.3: Detalhes do ensaio com a amostra 7 destacando-se as tolerâncias de pressão durante o teste

Ressalvados os capilares mais restritivos, observou-se um bom desempenho do medidor de vazão mássica. Percebe-se que as vazões tendem a assentar após cerca de 50 segundos de teste em todos os ensaios. Isso representa uma redução significativa nos tempos de ensaio ao se utilizar o medidor de vazão mássica. Citando como exemplo a amostra 1, cujo ensaio demorou em torno de 500 s, e considerando que a vazão estava assentada e foi lida através do medidor de vazão mássica no instante de 60 s, tem-se uma redução do período do teste maior que 800%. Lembra-se que uma das características desejáveis do aparato, apresentadas no capítulo introdutório, era que o tempo de teste fosse reduzido em, no mínimo 50%. Nota-se que com a utilização do medidor de vazão mássica esse requisito é atingido com folga.

Analisando os resultados dos ensaios (ver tabela 7.1), algo que chama atenção é a diferença entre os valores de pressão medidos pelo transdutor de pressão da bancada e os provenientes do transdutor que foi instalado adicionalmente. Percebe-se que existe claramente uma componente de erro sistemático de aproximadamente 0,08 bar. Como o transdutor extra foi calibrado recentemente, pode-se afirmar que o transdutor de pressão da bancada que apresenta desvio.

Tabela 7.1: Resultados dos testes com aquisição de dados

Amostra	$D_{capilar}$ (mm)	$l_{capilar}$ (m)	$P_{e,trans}$ [bar]	$P_{e,bancada}$ [bar]	Valor Teórico [kg/h]	$Q_m$ Bancada [kg/h]	$Q_m$ CMFS010 [kg/h]	Erro Bancada/ Teórico [%]	Erro CMFS010/ Teórico [%]	Erro Bancada/ CMFS010 [%]
1	0,518	3,00	8,0255	8,10	0,1546	0,1344	0,1433	13,03	7,31	6,17
2	0,53	3,00	8,0444	8,12	0,1641	0,1567	0,1669	4,48	1,72	6,10
3	0,61	3,00	8,0244	8,11	0,2326	0,1985	0,2089	14,65	10,17	4,99
4	0,642	3,00	8,0206	8,10	0,2642	0,2417	0,2558	8,50	3,17	5,51
5	0,70	3,00	8,0021	8,08	0,3272	0,3079	0,3221	5,90	1,55	4,42
6	0,79	3,00	8,0076	8,09	0,4430	0,4144	0,4268	6,44	3,64	2,91
7	0,83	3,00	8,0080	8,09	0,5012	0,4869	0,4990	2,86	0,44	2,43
8	0,91	3,00	8,0116	8,09	0,6312	0,5955	0,6034	5,65	4,40	1,30
9	0,92	3,00	8,0036	8,08	0,6480	0,6345	0,6450	2,08	0,46	1,62
10	1,07	1,00	4,4589	4,54	0,8955	0,9097	0,9217	1,58	2,93	1,30
11	1,07	3,00	8,0195	8,09	0,9472	1,0058	1,0150	6,19	7,15	0,90
12	1,07	5,00	7,9995	8,07	0,7318	0,7439	0,7624	1,65	4,17	2,42
13	1,37	5,00	4,4531	4,54	0,7396	0,7035	0,7108	4,88	4,58	1,03
14	1,63	5,00	4,4471	4,53	1,1438	1,0023	1,0452	12,37	8,62	4,10

É importante destacar que os valores da vazão mássica ( $Q_m$  CMFS010) e da pressão medida pelo transdutor de pressão adicional ( $P_{e,trans}$ ) inserido na tabela correspondem à média dessas variáveis no período em que a vazão ficou dentro da região de interesse. Para tal, tomou-se como base o instante 50 s, calculando a média dos

valores adquiridos desse instante até o fim do teste.

Os resultados foram também comparados com os testes realizados na etapa de análise prática dos medidores de vazão mássica estudados. A comparação foi feita novamente tomando-se como base o valor teórico da vazão em tubos capilares. Foram analisados os resultados dos testes feitos com os sensores CMFS010 e Mass 2100, sem aquisição de dados, e o teste do CMFS010 com aquisição de dados. Ressalta-se que a condição do último teste foi ligeiramente modificada, tendo em vista o novo sistema de medição de pressão utilizado. O cálculo do valor teórico foi feito com a média da pressão medida durante esses últimos ensaios.

A figura 7.4 ilustra os erros de medição dos medidores em relação ao valor teórico. Optou-se por plotar as linhas entre os pontos de cada amostra para que ficasse mais evidente a tendência do gráfico. Percebe-se que o erro de medição para cada amostra é similar nas três situações. Os testes realizados sem aquisição de dados, com o valor da medição sendo obtido por inspeção visual dos mostradores dos medidores, já apresentavam um valor bem próximo do ótimo. Tomam-se como valores ótimos os resultados dos últimos ensaios realizados, por terem sido obtidos através de média e monitoramento das variáveis do processo. Dito isso, pode-se arriscar dizer que as curvas no gráfico da figura 7.4 representam o erro do modelo teórico em relação à vazão real, sendo uma aproximação relativamente boa para capilares com diâmetro interno de 0,6 mm a 1,0 mm, referentes às amostras 4 a 12. Também analisou-se o erro de medição em relação ao valor teórico da bancada atual. Como pode ser visto na figura 7.5, o gráfico apresenta um padrão parecido com o encontrado no dos medidores de vazão mássica, mas ficando claro também a baixa repetitividade do aparato atual.

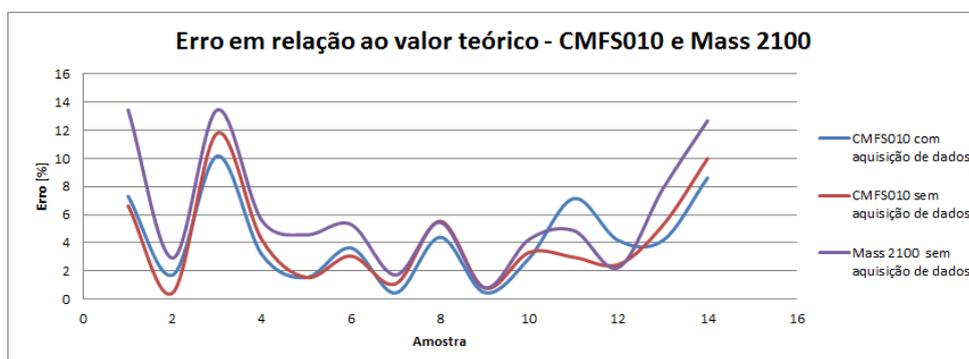


Figura 7.4: Erro dos medidores de vazão mássica em relação ao valor teórico

As medições da bancada também foram comparadas com as do medidor de vazão mássica (ver figura 7.6). Entende-se que os resultados das medições de vazão

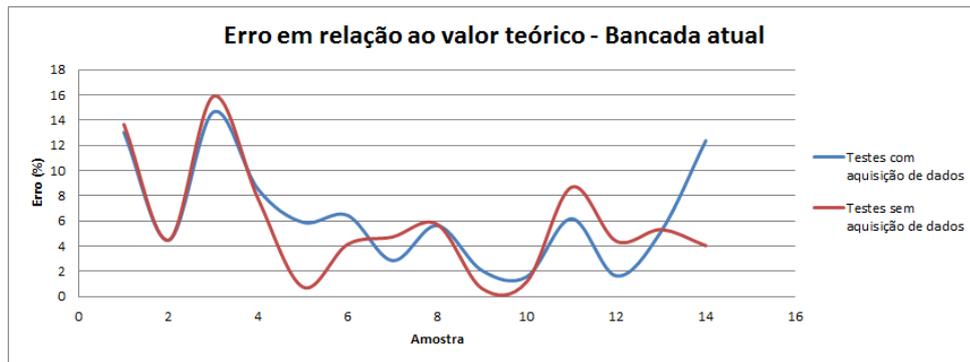


Figura 7.5: Erro da bancada atual em relação ao valor teórico

da última bateria de testes estão bem próximos das vazões reais. Isso tendo em vista a baixa incerteza de medição do equipamento (0,35%) e o modo como os resultados foram obtidos, através do cálculo do valor médio. Dessa forma, pode-se ver o gráfico da figura 7.6 como uma boa aproximação do erro da bancada em relação às vazões reais. Chama a atenção no gráfico a alta incerteza da bancada na medição de capilares de diâmetro reduzido. Destaca-se, no entanto, a baixa repetitividade da bancada vista nos testes até aqui e que dificulta a definição de algumas características e do desempenho efetivo do aparato.

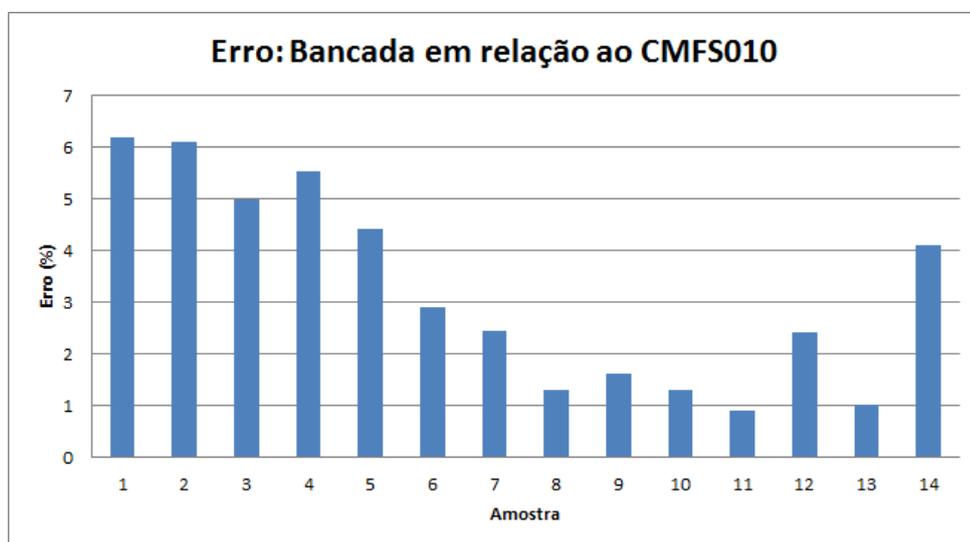


Figura 7.6: Erro da bancada atual em relação ao medidor CMFS010

Por fim, foi feita uma análise da boa representatividade de uma leitura de vazão instantânea em relação a um valor médio. Essa situação é importante pois é desse modo que serão feitas as leituras de vazão no aparato final. Para realizar essa comparação, obteve-se o valor da vazão mássica em cada amostra no instante de 60 s. Escolheu-se esse ponto pois em todos os testes a vazão já se encontrava aproximadamente acomodada nesse instante (à exceção da amostra 11, cujo teste durou

menos que 60 s e foi utilizado outro instante próximo ao fim do teste). Os resultados (ver tabela 7.2 e figura 7.7) mostram um erro considerável para as amostras de menor diâmetro. Isso é justificável, tendo em vista que os perfis de vazão dessas amostras apresentaram bastantes variações. Como comentado anteriormente neste capítulo, espera-se que essas flutuações sejam reduzidas significativamente com a utilização do regulador de pressão especificado. Atribui-se o fato de a amostra 2 ter apresentado um erro pequeno à aleatoriedade: a vazão instantânea lida coincidiu com um valor próximo da vazão média. Também chama atenção o fato de as demais medições apresentarem um erro menor que 1 %, revelando o bom funcionamento do método.

Tabela 7.2: Comparação entre uma amostra de vazão instantânea e a vazão média

<b>Amostra</b>	<b><math>P_e</math> [bar]</b>	<b><math>Q_{m,Instantânea}</math> [kg/h]</b>	<b><math>Q_{m,Média}</math> [kg/h]</b>	<b>Erro leitura/média [%]</b>
1	7,9945	0,1407	0,1433	1,7672
2	7,9989	0,1678	0,1669	0,5343
3	8,0500	0,2144	0,2089	2,6268
4	7,9901	0,2497	0,2558	2,3754
5	8,0111	0,3234	0,3221	0,4096
6	8,0076	0,4275	0,4268	0,1587
7	8,0144	0,4952	0,4990	0,7626
8	8,0028	0,6057	0,6034	0,3900
9	8,0104	0,6484	0,6450	0,5315
10	4,4521	0,9228	0,9217	0,1204
11	8,0196	1,0135	1,0150	0,1428
12	7,9939	0,7651	0,7624	0,3548
13	4,4531	0,7108	0,7108	0,0009
14	4,4401	1,0455	1,0452	0,0255

## 7.2: Novo aparato x Aparato atual

Já foi citado que o tempo necessário para a realização dos testes para medição de vazão em tubos capilares com o aparato que será construído é significativamente



Figura 7.7: Erro da vazão instantânea no instante de 60 s em relação à vazão média

menor que o necessário quando é utilizada a bancada atual. O equipamento existente tem seu princípio de funcionamento baseado no tempo que se toma para deslocar um volume conhecido de água (20 l). Deste modo, o período de duração do teste é variável em função da vazão medida: quanto menor a vazão de nitrogênio empurrando a água, mais tempo levará para todo o volume ser movimentado. Isso não acontece com o medidor de vazão mássica, com o qual a leitura da medição deve ser realizada quando não houver flutuações vazão, o que, conforme evidenciado nos testes, pode ser feito após aproximadamente 60 s depois do início do ensaio.

O fato de o medidor de vazão mássica não utilizar água na medição também é um ponto interessante e que atende ao requisito de sustentabilidade apresentado na introdução. Foi feita uma análise com base no Laboratório Tribologia, detentor da bancada atual, onde são medidos uma média de quase 200 capilares ao mês. A tabela 7.3 abaixo compara os testes utilizando a bancada existente e o medidor de vazão mássica, prevendo a economia que seria obtida utilizando-se o novo sistema de medição nesse laboratório.

Finalmente, comenta-se a respeito da portabilidade do novo aparato, a qual foi um dos requisitos chave a ser levado em consideração no projeto do novo sistema. Era desejável que o sistema pudesse ser transportado da maneira mais fácil possível, o que não acontece com a bancada existente, que é fixa. A utilização de dispositivos eletrônicos que o novo aparato seja relativamente compacto. A figura mostra uma comparação entre as medidas da bancada atual e do modelo do novo aparato de medição que será construído, ficando clara a sua boa capacidade de mobilidade.

Tabela 7.3: Análise de desperdício entre testes com a bancada atual e com medidor de vazão mássica

	Testes Bancada com tanque de água	Testes com medidor de vazão mássica
Capilares/mês	189	189
Vazão média [l/min]	2,66	2,66
Tempo médio de teste [min]	6,35	1
Nitrogênio utilizado [l]	3192,399	502,74
Água utilizada [l]	3780	0
Economia de N2/mês	2689,659	litros
Economia de água/mês	3780	litros

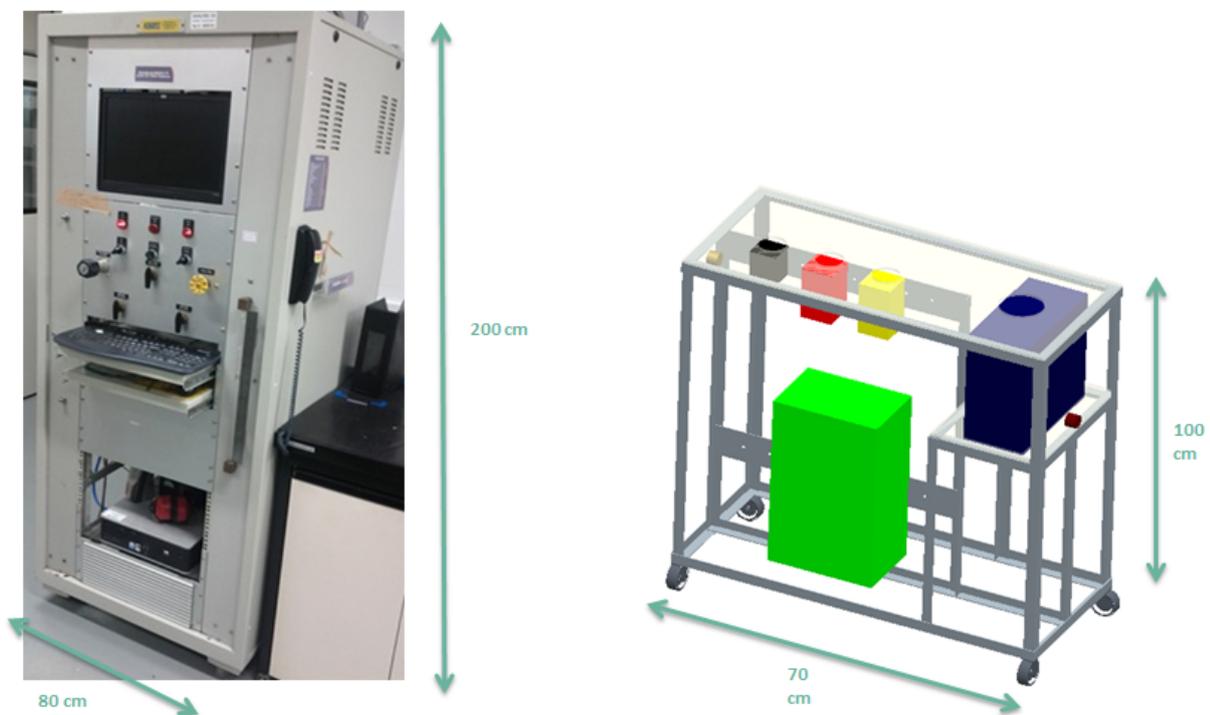


Figura 7.8: Comparação dimensional entre aparato atual e o modelo do novo aparato de medição

## **8      *Considerações Finais***

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Aplicação da Embraco, em Joinville, tendo como objetivo geral o projeto de um aparato experimental portátil para medição de vazão em tubos capilares. A empresa já detém uma bancada com tal função, no entanto, pretende-se construir um equipamento exclusivo para o Laboratório Aplicação e que seja portátil. Todo o projeto foi baseado na norma *ASHRAE 28*, mais especificamente no modelo alternativo proposto pela mesma.

O projeto teve início com a comparação de dois medidores de vazão mássica do tipo Coriolis disponíveis: Micro Motion CMFS010 e Siemens Mass 2100, com seus respectivos transmissores. Após comparação das especificações técnicas, análise de preço e testes práticos com os dispositivos foi selecionado o medidor da fabricante Micro Motion como melhor escolha. Isso por apresentar uma menor incerteza combinada (0,35% contra 0,60%), menor custo e melhor desempenho nos ensaios realizados. Esses testes foram feitos com 14 amostras diferentes de tubos capilares, obtidas de modo a representar toda a gama de capilares utilizados nas aplicações da empresa.

Após a seleção do medidor, foi realizada a definição do regulador de pressão, outro componente fundamental nesse tipo de sistema de medição. A determinação desse componente foi feita pela determinação do coeficiente de vazão da válvula a ser utilizada e das condições de pressão a serem utilizadas nos ensaios. Houve a possibilidade de se testar um equipamento bem parecido com o especificado, constando o bom desempenho do mesmo.

Como o alvo principal do projeto era a especificação dos componentes, tendo em vista que a montagem do aparato em si será realizada após o término do presente trabalho, optou-se por fazer uma análise de resultados de uma maneira alternativa. Tentou-se prever o comportamento da bancada que será montada, inserindo-se o medidor de vazão mássica e um transmissor de pressão no aparato existente com

o objetivo de analisar o comportamento do sistema. Assim, utilizando-se o padrão Modbus/RS-485 para realizar a comunicação com esses dispositivos e um software em Labview para a aquisição e o processamento dos dados, foi possível uma análise detalhada do comportamento do sistema de medição de vazão mássica frente ao sistema de medição da bancada atual.

Os testes realizados mostraram o bom desempenho do medidor de vazão mássica escolhido, revelando que é possível medir vazão em tubos capilares de um modo até 8 vezes mais rápido e com menor erro de medição. Também ressaltou-se a portabilidade do novo aparato de medição, que terá em sua composição essencialmente dispositivos eletrônicos, os quais tendem a ser mais compactos e exatos. Outro ponto de destaque da bancada que foi projetada é o fato de que, ao contrário do aparato existente, ela não utiliza água para realizar as medições, sendo mais sustentável que o sistema utilizado atualmente.

Como perspectiva de trabalho futuro sugere-se um análise do aparato experimental depois de pronto, com o intuito de avaliar o desempenho da bancada e realizar uma comparação dos resultados efetivos com os obtidos no presente trabalho.

Para finalizar, destaca-se que todos os objetivos propostos no início do projeto foram atingidos, tendo sido boa parte deles até superada. Ressalta-se também a importância dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia de Controle e Automação na realização deste trabalho. Além de tópicos específicos de informática industrial que tiveram aplicação direta no projeto, destaca-se o papel diferenciado do curso ao proporcionar uma visão ampla e interligada de processos de diferentes áreas. Ou seja, ao mesmo tempo em que fornece uma base sólida na parte de controle e automação industrial, proporciona um entendimento considerável de tópicos de mecânica dos fluidos, por exemplo. Esse entendimento abrangente e único disponibilizado pelo curso de Engenharia de Controle e Automação teve grande importância no presente trabalho.

## ***Referências***

- [1] PÖTTKER, G. Análise do Efeito Combinado de Compressores e Expansores de Ação Variável sobre o Desempenho de Sistemas de Refrigeração. Florianópolis Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.], 2006.
- [2] MARCINICHEN, J. B. Estudo Teórico e Experimental da Obstrução de Tubos Capilares por Adsorção de Óleo Éster. Florianópolis Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.], 2006.
- [3] JUST BETTER INDUSTRIES. Copper Capillary Tubing for Refrigeration and Air-Conditioning. Available from internet: <[http://www.hvacrinfo.com/pdf\\_misc/cap\\_tube\\_chart.pdf](http://www.hvacrinfo.com/pdf_misc/cap_tube_chart.pdf)>.
- [4] ASHRAE. Methods of Testing Flow Capacity of Refrigerant Capillary Tubes, ANSI/ASHRAE Standard 28.
- [5] RIBEIRO, M. A. Medição de Vazão - Fundamentos e Aplicações. 6ª edição. ed. [S.l.]: Tek Treinamento & Consultoria Ltda., 2004.
- [6] FREITAS, L. de. Sistemas Digitais de Controle. Av. Luis Tarquínio Pontes, 938 - Aracuí - Bahia: SENAI DR BA. - CETIND, 2007.
- [7] RIBEIRO, M. A. Medição de Petróleo e Gás Natural. 2ª edição. ed. [S.l.]: Tek Treinamento & Consultoria Ltda., 2003.
- [8] DOMELEN, D. J. V. Getting around the coriolis force. The Ohio State University - Department of Physics.
- [9] EMBRACO. Tabela de Aplicação de Compressores - 50Hz e 60Hz, R 134a e Misturas (Blends). Available from internet: <<http://www.embraco.com/DesktopModules/DownloadsAdmin/Arquivos/00003.pdf>>.
- [10] KIPP, E.; SCHMIDT, H. Bemessung von kapillarrohren als drosselorgan für kältesätze. Kältetechnik, February 1961.
- [11] BÄCKSTRÖM, M. Zur Berechnung des Kapillarrohres als Drosselongan. Kältetechnik 13, p. 283, 1958.
- [12] NATIONAL INSTRUMENTS. Introduction to Modbus. May 2012. Available from internet: <<http://www.ni.com/white-paper/7675/en>>.
- [13] SILVA, D. L. da. Análise Teórico-Experimental da Expansão Transcrítica de Dióxido de Carbono em Tubos Capilares Adiabáticos. Florianópolis Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.], 2008.

- [14] RIBEIRO, M. A. Válvulas de Controle e Segurança. 5. ed. [S.l.]: Tek Treinamento & Consultoria Ltda.
- [15] SWAGELOK. Pressure Regulators. April 2012. Available from internet: <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-02-230.PDF>>.
- [16] SWAGELOK. Pressure-Reducing Regulator Flow Curves - Technical Bulletin. October 2011. Available from internet: <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-06-114.PDF>>.
- [17] MODBUS-IDA.ORG. MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02. December 2006. Available from internet: <[http://www.modbus.com/docs/Modbus\\_over\\_serial\\_line\\_V1\\_02.pdf](http://www.modbus.com/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf)>.