

Miriam Zareth Parra Sejas

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA GRAVIMÉTRICA
AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO
COM DIFERENTES FLUIDOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sejas, Miriam Zareth

Desenvolvimento de uma Bancada Gravimétrica Automática
para Calibração de Medidores de Vazão com Diferentes
Fluidos / Miriam Zareth Sejas ; orientador, Rodolfo César
Costa Flesch - Florianópolis, SC, 2016.

134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Medição de
vazão. 3. Método gravimétrico. 4. Calibração de medidores
de vazão. I. Costa Flesch, Rodolfo César. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

Miriam Zareth Parra Sejas

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA GRAVIMÉTRICA
AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO
COM DIFERENTES FLUIDOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 19 de dezembro de 2016.



Prof. Daniel Ferreira Coutinho, Dr.
Coordenador do Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:



Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Francisco Rafael Moreira da Mota, Dr.
IFC



Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Dr.
EMC/UFSC



Prof. Nestor Roqueiro, Dr.
DAS/UFSC

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde, força e persistência para concluir o mestrado. Aos membros da banca, pelas valiosas contribuições aportadas a este trabalho.

Ao meu orientador Prof. Rodolfo Flesch, por ter sempre a porta da sua sala aberta quando mais precisei, pela paciência e tempo entregue no desenvolvimento deste projeto.

Ao Professor Prof. Julio Normay, pela oportunidade que me proporcionou de ser parte do programa PRH-34.

Agradeço de coração a toda minha família. A minha mãe, pela companhia, paciência e ajuda nestes dois anos. Aos meus irmãos Patty e Martin, meus cunhados Nena e Josué e os sobrinhos Alexandra, Ian e Krysmel, pela confiança, apoio e carinho que brindam para mim incondicionalmente. A Mirna, Pablo, Eleonor e Andrew pelas orações e palavras de força que alimentaram minha vontade de continuar. A Dona Russa, Don Ricardo, Hans e Estiffany pela ajuda e carinho.

Um agradecimento especial aos meus amigos Leandro e Fabricio por estarem sempre perto para me ajudar, a Eduarda e Gabriel pela amizade e lindos momentos que compartilhamos juntos.

A os amigos da Colômbia, Dayron, Sergio, Camilo, Deinis, Jessica, Andrea, Henrique e Richard, obrigado a todos pela sua amizade. A Bryant, por ser meu apoio em momentos de fraqueza. Obrigada pela paciência, ajuda e carinho do dia a dia. Tua companhia foi minha força o tempo todo. Te amo muito!

Finalmente, gostaria de agradecer à UFSC-DAS pelo ensino de qualidade, ao PRH-34, ANP, sem os quais essa dissertação dificilmente poderia ter sido realizada. E a todos mais que eu não tenha citado nesta lista de agradecimentos, mas que de uma forma ou de outra contribuíram não apenas para a minha dissertação, mas também para eu ser quem eu sou.

Muito obrigada!

A alegria que se tem em pensar e aprender
faz-nos pensar e aprender ainda mais.
(Aristóteles)

RESUMO

Atualmente nos processos de produção tornou-se muito delicado o tema dos erros na medição de vazão, já que esses erros representam geralmente perdas econômicas para as empresas. Com a finalidade de minimizar esses erros deve-se ter o cuidado de que os dados de medição dos instrumentos se encontrem dentro das especificações de incerteza de medição e para isso é importante realizar calibrações periódicas. Uma forma de realizar a calibração nos medidores de vazão é através das comparações mássicas (método gravimétrico), já que a massa é uma propriedade fundamental da matéria e seu valor não é alterado sob diferentes condições de temperatura e pressão, o que faz com que o processo de calibração de vazões mássicas ocorra de forma mais fácil. Em vista disso, o presente trabalho apresenta a descrição de dois sistemas de calibração implementados, ambos para baixas vazões de líquidos, de até 6 kg/h, e baseados no método gravimétrico. Um primeiro protótipo de baixo custo foi construído para identificar os pontos mais críticos e permitir a construção mais acertada de um segundo protótipo, a versão melhorada do primeiro. Para ambos os protótipos, foi usado um medidor de vazão tipo Coriolis como transdutor em avaliação, que serviu como padrão para avaliação das bancadas. O primeiro protótipo apresentou desvios da ordem de 2% quando seus resultados foram comparados com as indicações do medidor Coriolis. No segundo protótipo, foram corrigidos os pontos fracos do primeiro protótipo, e com isso foi possível diminuir 42 vezes o erro do primeiro protótipo em relação ao transdutor empregado como padrão, atingindo valores da ordem de 0,03%. A construção do segundo protótipo foi realizada de forma a permitir sua operação com diferentes fluidos de trabalho, sendo assegurada através de projeto a compatibilidade com água, diferentes tipos de óleo mineral e gasolina. Uma avaliação da incerteza de medição dos ensaios realizados com o segundo protótipo indicou uma incerteza expandida de $\pm 0,002$ kg/min, sendo esse valor inferior à incerteza encontrada para o medidor Coriolis, o tipo com melhores especificações metroológicas do mercado.

Palavras-chave: Medição de vazão. Método gravimétrico. Calibração de medidores de vazão.

ABSTRACT

Currently in production processes, flow measurement errors have become a serious issue, these errors generally represent economic losses. In order to minimize them, one must ensure that the measurement data of the instruments are within the specifications of measurement uncertainty and, for this purpose, it is important to perform periodic calibrations. One way to perform flow meter calibrations is through mass comparisons (gravimetric method), since the mass is a fundamental property of matter and its value is not changed under different conditions of temperature and pressure, which allows the mass flow calibration process to occur more easily. In view of this, the present work presents the description of two calibration systems implemented for operating with low flow rates of liquids, up to 6 kg/h, and based on the gravimetric method. A first prototype of low cost was built to identify the most critical points and, thus, support the development of a second prototype, an improved version of the first. For both prototypes, a Coriolis flowmeter was used in the position of the transducer to be evaluated, but it, in fact, served as a standard for evaluating the responses of both systems. The first prototype presented errors around 2% when its measurements are compared with the indications of the Coriolis meter. The second prototype corrected the main weaknesses of the first prototype, achieving errors 42 times lower than the ones presented by the first prototype (absolute errors are of approximately 0.03%). The second prototype was designed to allow its operation with different working fluids, being ensured through project compatibility with water, different types of mineral oil, and gasoline. An evaluation of the measurement uncertainty of the second prototype indicated an expanded measurement uncertainty of ± 0.002 kg/min, which is lower than the uncertainty value found for the Coriolis meter, the flowmeter principle with better metrological specifications in the market.

Keywords: Flow measurement. Gravimetric method. Flowmeter calibration.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Forças de arraste entre duas placas | 34 |
| 2.2 | Classificação dos medidores de vazão | 37 |
| 2.3 | Componentes dos medidores de vazão Coriolis | 42 |
| 2.4 | Comportamento dos tubos com e sem vazão em um medidor do tipo Coriolis | 42 |
| 2.5 | Sinais detectados pelos sensores | 43 |
| 2.6 | Medidor tipo turbina | 46 |
| 2.7 | Método de calibração do provador | 48 |
| 2.8 | Medidor mestre e medidor a ser calibrado em serie | 49 |
| 2.9 | Método de calibração volumétrico | 50 |
| 2.10 | Método de calibração gravimétrico | 52 |
| 2.11 | Estrutura de um gasômetro | 54 |
| 2.12 | Gasômetro | 55 |
| | | |
| 3.1 | Esquema de montagem do primeiro protótipo de bancada | 58 |
| 3.2 | Unidade Eletrônica Remota | 60 |
| 3.3 | Balança semi-analítica marca MARTE serie UX6200H | 62 |
| 3.4 | Moto-Bomba DC | 63 |
| 3.5 | Garrafa PET de 10 litros | 63 |
| 3.6 | Comunicação entre o Labview, o medidor Coriolis e a balança | 64 |
| 3.7 | Lógica usada no SCADA | 66 |
| 3.8 | Lógica para o processamento dos dados no supervisório | 67 |
| 3.9 | Tanques, bomba e Coriolis da bancada implementada | 69 |
| 3.10 | Balança e reservatório para pesagem da bancada implementada | 69 |
| 3.11 | Dinâmica do processo de medição | 70 |
| 3.12 | Curva de erros | 72 |
| 3.13 | Relação entre o tempo total do ensaio e o tempo em regime | 81 |
| 3.14 | $RM \pm U$ das medições com o Coriolis e o método Gravimétrico | 95 |
| 3.15 | $RM \pm U$ para vazão nominal de 0,06 kg/min | 96 |
| 3.16 | $RM \pm U$ para vazão nominal de 0,07 kg/min | 96 |
| 3.17 | $RM \pm U$ para vazão nominal de 0,08 kg/min | 97 |
| 3.18 | $RM \pm U$ para vazão nominal de 0,09 kg/min | 97 |
| | | |
| 4.1 | Esquema de montagem do segundo protótipo de bancada | 100 |
| 4.2 | Bomba com acoplamento magnético | 101 |
| 4.3 | Bomba com acoplamento magnético | 101 |
| 4.4 | Tanque pulmão do segundo protótipo de bancada | 103 |
| 4.5 | Tanque de descarga do segundo protótipo de bancada | 104 |

| | | |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6 | Comunicação entre o Labview o medidor Coriolis e a balança | 105 |
| 4.7 | Tanques e bomba do segundo protótipo de bancada . . . | 106 |
| 4.8 | Balança e válvula diversora do segundo protótipo de bancada | 107 |
| 4.9 | Estrutura completa do segundo protótipo de bancada . . | 108 |
| 4.10 | Curva de erros | 109 |
| 4.11 | $(RM \pm U)$ kg/min | 119 |
| | | |
| 5.1 | Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada da massa | 123 |
| 5.2 | Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada do tempo | 124 |
| 5.3 | Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza instrumental na medição da vazão mássica . . | 125 |
| 5.4 | Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 126 |
| 5.5 | Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada da medição de vazão com o Coriolis | 127 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Descrição dos medidores de vazão da classificação NBR 10396. 1988 | 38 |
| 2.2 | Características ofertadas pelos principais fornecedores de medidores de tipo Coriolis | 45 |
| 3.1 | Especificações técnicas da REU | 61 |
| 3.2 | Especificações da balança | 62 |
| 3.3 | Resultados dos ensaios com o primeiro protótipo de bancada | 71 |
| 3.4 | Cálculo do fator de compensação para o efeito do empuxo do ar para cima | 78 |
| 3.5 | Incertezas da repetibilidade, resolução e linearidade da balança | 78 |
| 3.6 | Incerteza do coeficiente de temperatura dT | 79 |
| 3.7 | Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida da variação na massa | 79 |
| 3.8 | Incerteza para a medições do tempo na região de regime | 83 |
| 3.9 | Incerteza da resolução do contador de tempo | 83 |
| 3.10 | Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida da variação no tempo | 84 |
| 3.11 | Incerteza instrumental padrão e incerteza instrumental expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 85 |
| 3.12 | Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica | 86 |
| 3.13 | Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica instantânea | 87 |
| 3.14 | Incertezas padrão e expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 88 |
| 3.15 | Vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 88 |
| 3.16 | Incerteza padrão e graus de liberdade na medição de vazão com o Coriolis | 92 |
| 3.17 | Incerteza da repetibilidade dos ensaios na medição da vazão mássica com o Coriolis | 93 |
| 3.18 | Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida associada à medição de vazão mássica com o Coriolis | 94 |
| 3.19 | Vazão mássica obtida com o Coriolis | 94 |
| 4.1 | Resultados dos ensaios com o segundo protótipo de bancada | 109 |

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 | Cálculo do fator de compensação para o efeito do empuxo do ar para cima | 111 |
| 4.3 | Incertezas da repetibilidade, resolução e linearidade da balança | 111 |
| 4.4 | Incerteza do coeficiente de temperatura dT | 112 |
| 4.5 | Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida da variação na massa | 112 |
| 4.6 | Incerteza para a medições do tempo na região de regime | 113 |
| 4.7 | Incerteza da resolução do contador de tempo | 114 |
| 4.8 | Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos da variação no tempo | 114 |
| 4.9 | Incertezas padrão e expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 115 |
| 4.10 | Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica | 115 |
| 4.11 | Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica instantânea | 115 |
| 4.12 | Incertezas padrão e expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 116 |
| 4.13 | Vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 116 |
| 4.14 | Incerteza padrão e graus de liberdade na medição de vazão com o Coriolis | 117 |
| 4.15 | Incerteza da repetibilidade dos ensaios na medição da vazão mássica com o Coriolis | 118 |
| 4.16 | Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida associada à medição de vazão mássica com o Coriolis | 118 |
| 4.17 | Vazão mássica obtida com o Coriolis | 119 |

SÍMBOLOS

| | | |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| C_{ad} | erro máximo no conversor A/D da placa de aquisição . . . | 90 |
| D | diâmetro da tubulação | 35 |
| E_c | erro combinado do Coriolis | 89 |
| E_z | estabilidade do zero no Coriolis | 89 |
| Q_V | vazão volumétrica | 31 |
| Q_m | vazão mássica | 31 |
| R_B | resolução da balança | 74 |
| R_C | resolução do contador de tempo | 80 |
| R_p | parcela da resolução associada à placa de aquisição | 90 |
| R_v | incerteza da referência de tensão na fonte de alimentação da placa de aquisição | 90 |
| R_{pA} | resolução da placa de aquisição de dados | 90 |
| Re_B | repetibilidade da balança | 74 |
| Re | número de Reynolds | 35 |
| V_f | volume obtido finalizando a coleta | 50 |
| V_i | volume que se tem ao iniciar a coleta | 50 |
| V | volume | 32 |
| \bar{Q}_m | média da vazão mássica | 51 |
| dV | variação de volume | 31 |
| dm | variação de massa | 31 |
| dt | variação de tempo | 31 |
| μ | viscosidade absoluta do fluido | 35 |
| $\rho_{1,2}$ | massa específica relativa ou densidade | 33 |
| ρ_1 | massa específica da substância de trabalho | 33 |
| ρ_2 | massa específica escolhida como referência | 33 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ρ massa específica | 32 |
| dT coeficiente de temperatura na sensibilidade da balança . . | 74 |
| lin linearidade da balança | 74 |
| m_{REF} massa coletada, determinada pela pesagem | 51 |
| m massa | 32 |
| t_f tempo final do ensaio | 50 |
| t_i tempo de início de ensaio | 50 |
| t_{MED} período de coleta | 51 |
| u_{E_c} incerteza padrão referente erro combinado do Coriolis . | 91 |
| u_{E_z} incerteza padrão referente à estabilidade do zero | 91 |
| u_{I_m} incerteza padrão instrumental da massa | 76 |
| $u_{I_{Q_m}}$ incerteza padrão instrumental da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 85 |
| $u_{Q_{mG}}$ incerteza padrão da vazão mássica obtida com o método gra- vimétrico | 87 |
| $u_{Q_{mC}}$ incerteza padrão da vazão mássica obtida com o Coriolis | 92 |
| u_{R_p} incerteza padrão referente à placa de aquisição | 91 |
| u_{R_B} incerteza padrão referente à resolução | 75 |
| u_{Re_B} incerteza padrão referente à repetibilidade | 76 |
| $u_{Re_{Q_{mG}}}$ incerteza padrão da repetibilidade da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 86 |
| $u_{\Delta t}$ incerteza padrão referente à variação no tempo | 82 |
| u_{dT} incerteza padrão referente à coeficiente de temperatura na sen- sibilidade | 76 |
| u_{lin} incerteza padrão referente à linearidade | 76 |
| u_t incerteza padrão referente à medição de tempo na região em regime | 82 |

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| v_{ef} graus de liberdade | 77 |
| v velocidade de escoamento do fluido | 35 |
| w valor verdadeiro convencional da massa | 53 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Introdução | 25 |
| 1.1 | Objetivos | 28 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 28 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 28 |
| 1.2 | Delimitação do trabalho | 28 |
| 1.3 | Estrutura do documento | 29 |
| 2 | Revisão da literatura | 31 |
| 2.1 | Definição de Vazão | 31 |
| 2.2 | Propriedades dos fluidos | 32 |
| 2.2.1 | Massa específica | 32 |
| 2.2.2 | Viscosidade | 33 |
| 2.2.3 | Número de Reynolds | 34 |
| 2.3 | Medidores de Vazão | 36 |
| 2.3.1 | Classificação dos medidores de vazão | 36 |
| 2.3.2 | Princípio de funcionamento do medidor de vazão Coriolis | 40 |
| 2.3.3 | Princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo turbina | 45 |
| 2.4 | Métodos de calibração dos medidores de vazão | 46 |
| 2.4.1 | Provadores | 47 |
| 2.4.2 | Medidor mestre | 49 |
| 2.4.3 | Método volumétrico | 49 |
| 2.4.4 | Método gravimétrico | 51 |
| 2.4.5 | Gasômetro | 53 |
| 3 | Desenvolvimento do primeiro protótipo de bancada | 57 |
| 3.1 | Seleção do método de calibração | 57 |
| 3.1.1 | Estrutura mecânica do primeiro protótipo de bancada | 57 |
| 3.2 | Descrição e seleção dos principais componentes do primeiro protótipo | 59 |
| 3.2.1 | Medidor de vazão tipo Coriolis | 59 |
| 3.2.2 | Balança | 61 |
| 3.2.3 | Bomba de recirculação | 63 |
| 3.2.4 | Tanques | 63 |
| 3.2.5 | Sistema de aquisição dos dados | 64 |
| 3.3 | Resultados | 68 |
| 3.3.1 | Avaliação das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 72 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.1.1 | Avaliação das incertezas nas medições de massa feitas com a balança | 73 |
| 3.3.1.2 | Avaliação das incertezas na medição de tempo | 77 |
| 3.3.1.3 | Avaliação das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 84 |
| 3.3.2 | Avaliação das incertezas na medição da vazão mássica com o Coriolis | 89 |
| 4 | Desenvolvimento do segundo protótipo de bancada | 99 |
| 4.1 | Estrutura mecânica do segundo protótipo de bancada | 99 |
| 4.2 | Descrição e seleção dos principais componentes do segundo protótipo | 100 |
| 4.2.1 | Balança | 100 |
| 4.2.2 | Bomba de recirculação | 100 |
| 4.2.3 | Tanques | 102 |
| 4.2.4 | Válvula diversora | 104 |
| 4.2.5 | Sistema de aquisição de dados | 105 |
| 4.3 | Resultados | 106 |
| 4.3.1 | Avaliação das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 110 |
| 4.3.1.1 | Avaliação das incertezas nas medições de massa feitas com a balança | 110 |
| 4.3.1.2 | Avaliação das incertezas de medição do tempo | 112 |
| 4.3.1.3 | Cálculo das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico | 114 |
| 4.3.2 | Avaliação das incertezas na medição da vazão mássica com o Coriolis | 116 |
| 5 | Considerações finais | 121 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 127 |
| | Referências | 129 |

1 INTRODUÇÃO

Nos processos industriais é fundamental que se efetue continuamente a medição de vazão dos fluidos do processo não só para o controle operacional do mesmo, detecção de vazamento do fluido ou verificação se o processo está produzindo a vazão estimada, mas também para a movimentação de produtos entre campos e unidade de recepção, entre unidades ou para fornecimento a terceiros [1]. De forma mais específica, na indústria de petróleo, a medição de vazão é necessária para contabilizar a produção (óleo, gás, água), avaliar desempenho dos poços produtores e dar bases aos cálculos de custos, taxas e impostos em atendimento às normas das agências reguladoras, como: Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (Inmetro), Núcleo de Fiscalização da Medição da Produção de Petróleo e Gás Natural (NFP) da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) e American Petroleum Institute (API).

Como geralmente os volumes de produção envolvidos na área de petróleo são enormes, erros de medição na ordem de poucos pontos percentuais podem levar a prejuízos de grande monta. Dessa forma, é muito importante manter os instrumentos devidamente calibrados, para poder garantir que os resultados obtidos sejam reais e que os erros sejam mantidos dentro de valores bem conhecidos [2].

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia [3, p. 41],

calibração é a operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

Portanto, para calibrar um instrumento é preciso dispor de um padrão, a fim de fornecer o valor verdadeiro convencional para a grandeza. Em muitos casos, esse padrão é um sistema de medição da mesma grandeza com incerteza menor e com rastreabilidade a padrões internacionais de referência, porém em outras situações as calibrações são realizadas em aparatos experimentais que reproduzem a definição da grandeza medida a partir de outras grandezas para as quais se dispõe de padrões [4].

O processo de calibração, além de permitir realizar ajustes

para compensar as parcelas sistemáticas de erro, permite que seja avaliada a parcela aleatória de incerteza de medição. Dessa forma, em ambientes industriais é fundamental a realização de calibrações periódicas para corrigir as derivas temporais dos instrumentos e para monitorar como a parcela aleatória se comporta com o passar do tempo, a fim de estabelecer o momento de substituição dos mesmos [4].

Quando um instrumento experimenta variações de temperatura, tensão mecânica ou simplesmente tem muito tempo de uso, a incerteza do instrumento tipicamente aumenta. A implicação direta disso é que os dados de medição do instrumento passam a não ser mais confiáveis, o que pode levar a perdas econômicas, problemas com a segurança, problemas ambientais, entre outros. Mesmo que esse problema não possa ser completamente eliminado, ele pode ser detectado e minimizado mediante calibrações periódicas. Muitas empresas tentam evitar as calibrações, devido aos custos, mas às vezes o custo de evitar a calibração é maior que o de não realizá-la. Esse custo maior pode estar associado ao efeito econômico direto de medições com erros elevados ou mesmo a paradas não programadas da produção e quedas da qualidade dos produtos [5].

A calibração garante que as derivas dos instrumentos sejam monitoradas e que possam ser compensadas. Até os instrumentos de maior qualidade, tidos como padrões de laboratório, apresentam especificações de deriva e necessitam de calibrações periódicas para que suas indicações sejam confiáveis. No caso dos instrumentos de campo, há ainda mais razão para que existam constantes calibrações, já que estão constantemente expostos a variações de temperatura, vibração, impactos, campos magnéticos e outros fatores que podem fazer com que os valores das medições sejam modificados e passem a ocupar uma região fora dos limites especificados no equipamento. Por conseguinte, é fundamental calibrar todos os instrumentos com a frequência adequada [5]. Na indústria de petróleo, por exemplo, a falta de calibração pode acarretar multas e suspensão de operação [2].

A calibração dos medidores de vazão pode ser realizada por meio de comparações volumétricas ou mássicas, sendo as primeiras mais empregadas para medidores de vazão volumétrica e as segundas para medidores de vazão mássica. A massa é uma propriedade fundamental da matéria e seu valor não é alterado sob diferentes condições de temperatura e pressão, o que faz com que o processo de calibração de vazões mássicas seja mais fácil do que o de vazão volumétrica e tipicamente esteja associado a menores

incertezas. Deve-se notar que alguns líquidos, em particular os hidrocarbonetos, têm fatores de expansão térmica significativamente maiores que o da água. Isso faz com que a compensação da temperatura e pressão para a medição de vazão de líquido de hidrocarbonetos seja muito importante caso seja empregado algum princípio de vazão volumétrica e não com base em massa [6].

Como regra geral, os medidores de vazão para líquidos são calibrados usando água e medidores de vazão para vapor são calibrados usando ar seco. Caso o fluido de trabalho seja diferente de um desses dois, em alguns casos é possível corrigir matematicamente parte das diferenças causadas pelas diferentes características, como massa específica e viscosidade, mas nem sempre essas compensações levam a bons resultados [7].

O ideal seria poder efetuar a calibração em campo usando diretamente os fluidos de trabalho para as calibrações. Atualmente existem poucas empresas que oferecem esse tipo de serviço e os custos envolvidos são muito grandes. Os fabricantes de medidores de vazão tipicamente oferecem esse tipo de serviço de calibração com alguns fluidos diferentes de água e ar seco através da cobrança de uma taxa extra, mas isso só é possível na primeira calibração realizada, logo que o instrumento é adquirido.

Assim, depois da primeira calibração quase todos os medidores de vazão da indústria são calibrados com água ou ar seco. Essa calibração muitas vezes gera compensações de zero e de sensibilidade que não necessariamente são as mesmas que deveriam ser empregadas para fluidos diversos desses. Em medidores de vazão mássica do tipo Coriolis, os de mais baixa incerteza disponíveis no mercado para aplicações comerciais, os fabricantes geralmente garantem que não há influência do fluido de trabalho no valor medido [8] [9] [10], mas não foi localizado um trabalho específico que comprove essa afirmação para produtos derivados de petróleo.

Sabe-se de trabalhos anteriores que em condições dinâmicas de ensaio os resultados apresentados por esse tipo de medidor não respeitam as especificações de incerteza apresentadas pelos fabricantes. Além disso, em escoamentos bifásicos ou polifásicos os resultados também podem divergir bastante do esperado [11]. Como forma de contribuir para essa avaliação e também para a análise do comportamento de diferentes princípios de medição de vazão quando submetidos a diferentes fluidos, o presente trabalho visa desenvolver uma bancada que permita calibrar medidores de vazão com diferentes fluidos de trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho visa projetar e construir uma bancada de calibração de medidores de vazão que possa ser empregada com diferentes fluidos de trabalho, inclusive fluidos explosivos e inflamáveis.

1.1.2 Objetivos específicos

A pesquisa vinculada à presente proposta de dissertação terá como objetivos específicos:

- projetar uma bancada protótipo de calibração de medidores de vazão a ser implementada;
- dimensionar e definir os equipamentos a serem usados no protótipo;
- fazer a montagem do protótipo de bancada de calibração;
- automatizar os ensaios de calibração realizados com a bancada;
- avaliar os resultados apresentados pela bancada quando comparados com os indicados por um transdutor de vazão mássica do tipo Coriolis tendo como fluido de trabalho a água (fluido empregado nas calibrações anteriores do transdutor empregado);
- avaliar as incertezas de medição apresentadas pela bancada desenvolvida.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Como a bancada usada para os testes será montada no laboratório, o projeto será delimitado a trabalhar com intervalos de medição de até 6 kg/h. Além disso, a bancada será projetada de forma a ter compatibilidade com água, gasolina e alguns tipos de óleo mineral. Isso não impede seu uso com fluidos diferentes desses, mas deve-se avaliar a compatibilidade dos componentes e vedações antes de serem empregados fluidos diversos dos citados. Vale também ressaltar que este trabalho não realizará a avaliação experimental de diferentes medidores de vazão com diferentes fluidos, mas criará uma bancada que permita realizar essa avaliação em momento futuro.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em cinco capítulos e seus principais tópicos estão descritos na sequência.

No capítulo dois é feita uma breve revisão da literatura iniciando com as principais propriedades dos fluidos, um pouco da classificação dos medidores de vazão e uma descrição do princípio de funcionamento do medidor tipo Coriolis e dos medidores de vazão de tipo turbina, concluindo com uma revisão dos principais métodos de calibração dos medidores de vazão.

No terceiro capítulo apresenta-se o desenvolvimento do primeiro protótipo de bancada. Nesse capítulo é detalhada a descrição do método de calibração escolhido, a descrição e seleção dos principais componentes que fazem parte do primeiro protótipo e os resultados obtidos com esse protótipo de bancada, conjuntamente com a análise das fontes de incerteza que influenciam nas medições e uma avaliação da incerteza do processo de calibração empregando esse protótipo.

O quarto capítulo apresenta a mesma estrutura do terceiro capítulo, com a diferença que nesse capítulo é descrito o desenvolvimento do segundo protótipo de bancada, sendo esta bancada uma versão melhorada do primeiro protótipo.

Por último, no quinto capítulo é apresentada a conclusão em relação ao objetivo proposto conjuntamente com uma análise dos resultados alcançados e as sugestões para a continuidade do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão preliminar da literatura sobre medidores de vazão, processos de calibração para medidores de vazão e as principais propriedades físicas que influenciam na medição da grandeza de interesse.

2.1 DEFINIÇÃO DE VAZÃO

A vazão volumétrica (Q_V) é definida na equação (2.1) como a quantidade de volume que escoou através de uma seção em um intervalo de tempo, estando o fluido na pressão e temperatura de referência [12].

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

onde:

| | |
|------|---------------------|
| dV | variação de volume; |
| dt | variação de tempo. |

Na medição de vazão volumétrica é importante referenciar as condições básicas de pressão e temperatura, visto que conhecendo a pressão e a temperatura do fluido é possível obter a massa específica do mesmo, desde que não se encontre em condição de saturação.

A vazão mássica (Q_m) é definida na equação (2.2) como a quantidade em massa de um fluido que escoou através de uma seção em um intervalo de tempo [12]. Como a massa é uma propriedade fundamental da matéria, que não é alterada em função de seu estado termodinâmico, nas medições de vazão mássica não é necessário estabelecer uma condição de referência.

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad (2.2)$$

onde:

| | |
|------|--------------------|
| dm | variação de massa; |
| dt | variação de tempo. |

2.2 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

Para a abordagem de um estudo sobre medidores de vazão é muito importante conhecer algumas das propriedades dos fluidos de trabalho, tanto para a compreensão dos princípios de funcionamento, como para a justificativa das aplicações. Conhecendo os efeitos causados pelos fluidos, eles podem ser corrigidos e os erros minimizados. As principais características dos fluidos que influenciam na medição de vazão são massa específica e viscosidade [6]. Além dessas duas propriedades, será apresentada também uma breve revisão sobre o perfil de escoamento de um fluido, caracterizado pelo número de Reynolds. Essa característica, apresentada na seção 2.2.3, apesar de não ser uma propriedade do fluido é outro fator importante e que deve ser levado em consideração para que se possa medir corretamente a vazão de fluidos.

2.2.1 Massa específica

A massa específica é uma grandeza que revela a quantidade de matéria que está presente em uma unidade de volume [13]. Trata-se de uma propriedade importante dos fluidos e está relacionada com a composição de misturas e soluções químicas e com a concentração de sólidos em suspensão [14]. Na medição de vazão, a massa específica é importante como um meio de inferir a vazão mássica de fluidos compressíveis a partir da vazão volumétrica medida. Além disso, alguns princípios de medição são mais adequados para fluidos de alta massa específica, como os medidores de deslocamento positivo por engrenagens ovais, e outros são mais adequados para fluidos de baixa massa específica, como os medidores volumétricos por diafragma.

A massa específica absoluta (ρ), detalhada na equação (2.3), é definida como a razão entre a massa e o volume de um corpo. Sua unidade no sistema internacional de unidades é o quilograma por metro cúbico (kg/m^3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

onde:

| | |
|-----|---------|
| m | massa; |
| V | volume. |

Além da massa específica absoluta, muitas vezes se emprega o conceito de massa específica relativa ou densidade ($\rho_{1,2}$), que consiste em um número adimensional que expressa a razão entre a massa específica de uma substância e uma massa específica de referência. A densidade de sólidos e líquidos tipicamente é expressa em relação à massa específica da água e a de gases tipicamente é expressa em relação ao ar seco e isento de dióxido de carbono ou hidrogênio. Por esse motivo, a densidade da água e do ar nas condições de referência são iguais a um [14]. Matematicamente, essa relação é apresentada na equação (2.4), onde ρ_1 é a massa específica da substância com a qual se está trabalhando e ρ_2 é a massa específica escolhida como referência. Para sólidos e líquidos tipicamente é usada como referência a massa específica da água a 25°C, que vale 1000 kg/m³.

$$\rho_{1,2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (2.4)$$

Além de o valor absoluto da massa específica ser importante para que possa ser realizada a conversão entre vazões mássica (Q_m) e volumétrica (Q_V), considerando que a relação entre elas é a descrita na equação (2.5), a variação da massa específica é importante para determinar se o escoamento é compressível ou incompressível [15]. Um escoamento em que a massa específica do fluido varia significativamente é um escoamento compressível, enquanto que um escoamento no qual a massa específica não varia significativamente é dito incompressível [14].

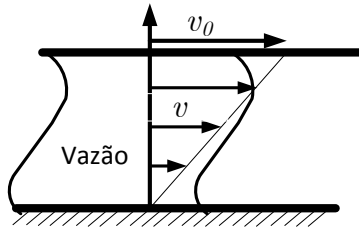
$$Q_m = Q_V \cdot \rho \quad (2.5)$$

2.2.2 Viscosidade

A viscosidade é uma medida quantitativa da resistência ao escoamento de um fluido em um duto qualquer [16]. Essa resistência provoca uma perda de carga adicional, que deve ser considerada na medição de vazão.

Pode-se obter a viscosidade de um fluido medindo as forças de arraste entre duas placas paralelas cujo espaço é preenchido com o fluido de interesse. A força (F) necessária para manter a placa superior movendo-se a uma velocidade constante v_0 é mostrada na equação (2.6), onde v_0 é proporcional à área da placa vezes v/y , sendo v a velocidade média do escoamento e y a distância entre as placas, como se mostra na Figura 2.1 [17].

Figura 2.1: Forças de arraste entre duas placas.



Fonte: [17]

$$F = \mu A \frac{v}{y} \quad (2.6)$$

A constante de proporcionalidade μ é chamada de viscosidade. A viscosidade é expressa em pascal-segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), ou newton-segundo por metro quadrado ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) em unidade do SI.

Praticamente todos os líquidos diminuem sua viscosidade com o aumento da temperatura e aumentam sua viscosidade quando são resfriados. Além disso, a viscosidade absoluta dos líquidos é diretamente proporcional à pressão, ou seja, o aumento da pressão aumenta a viscosidade dos líquidos. Os líquidos mais compressíveis, como os hidrocarbonetos leves, são mais sensíveis a variações de pressão [14].

A viscosidade absoluta dos gases e vapores é diretamente proporcional à temperatura, ou seja, possuem comportamento oposto ao apresentado por líquidos. Porém, em pressões muito elevadas, a viscosidade é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, gases submetidos a altíssima pressão se comportam como líquidos [16].

Pequenas variações na viscosidade tipicamente afetam somente o número de Reynolds e essa pequena variação, na maioria dos casos, tem pequena influência na vazão [14].

2.2.3 Número de Reynolds

Para um fluido incompressível, sem força gravitacional, a sua vazão é governada pelas forças inerciais e pelas forças viscosas. A relação entre essas forças é dada pelo número de Reynolds, tipica-

mente representado como Re ou NRe [6]. Osborne Reynolds mostrou que a natureza da vazão em uma tubulação pode ser laminar ou turbulenta e que a definição do padrão de escoamento depende de:

1. diâmetro da tubulação;
2. massa específica;
3. viscosidade;
4. velocidade do fluido.

Na equação (2.7) mostra-se como combinar esses fatores para dar origem ao número de Reynolds, que é um coeficiente adimensional.

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (2.7)$$

onde:

| | |
|--------|-------------------------------------|
| D | diâmetro da tubulação; |
| v | velocidade de escoamento do fluido; |
| ρ | massa específica do fluido; |
| μ | viscosidade absoluta do fluido. |

Fisicamente, o número de Reynolds é considerado como a relação das forças dinâmicas da vazão mássica com a tensão de cisalhamento provocada pela viscosidade [6]. Assim, a relação entre a viscosidade e o número de Reynolds é inversa, ou seja, para fluidos com uma viscosidade grande o número de Reynolds é pequeno, produzindo um escoamento laminar, e se a viscosidade é pequena o número de Reynolds é grande, produzindo um escoamento turbulento.

Para fins de engenharia, a vazão em tubulações é usualmente considerada laminar se o número de Reynolds é menor que 2000 e a vazão é considerada turbulenta para valores maiores que 4000 [14].

2.3 MEDIDORES DE VAZÃO

No século XX, a demanda por medição da vazão de fluidos se tornou mais presente, principalmente devido ao crescimento da aplicação dos processos contínuos na indústria [18]. No início, a medição de vazão era utilizada apenas como um parâmetro para operar sistemas hidráulicos e fazer a dosagem de produtos químicos, o que fazia com que a incerteza de medição ficasse em segundo plano. Com a adoção cada vez maior das medições de vazão nos mais diversos ramos da indústria, a questão da incerteza passou a tomar papel de cada vez mais destaque. Hoje, a garantia da incerteza é fundamental para que se possam assegurar as condições operacionais em processos industriais [19]. Um exemplo da necessidade de exatidão na medição de vazão é ilustrado em sistemas nos quais há transferência de custódia, visto que esse tipo de sistema tem uma função de balanço e o erro de medição implica um prejuízo econômico para as partes envolvidas. Atualmente, o API (American Petroleum Institute) exige uma incerteza de 0,05% para processos de transferência de custódia [20].

A constante busca pelo aumento da eficiência e redução de custos levou a uma crescente utilização de medidores de vazão na venda de produtos (gasolina, óleo, gás, água, entre outros), na concentração da informação, na proteção ambiental e em processos industriais. Deste modo, torna-se cada vez mais importante que as incertezas associadas às medições de vazão sejam conhecidas [21].

Os diferentes princípios físicos são apresentados em linhas gerais na seção 2.3.1, segundo a classificação da norma brasileira NBR 10396. Em seguida, nas seções 2.3.2 e 2.3.3 são apresentados em mais detalhes os princípios de funcionamento de dois dos princípios com mais baixa incerteza de medição para a aplicação específica deste projeto, Coriolis e turbinas.

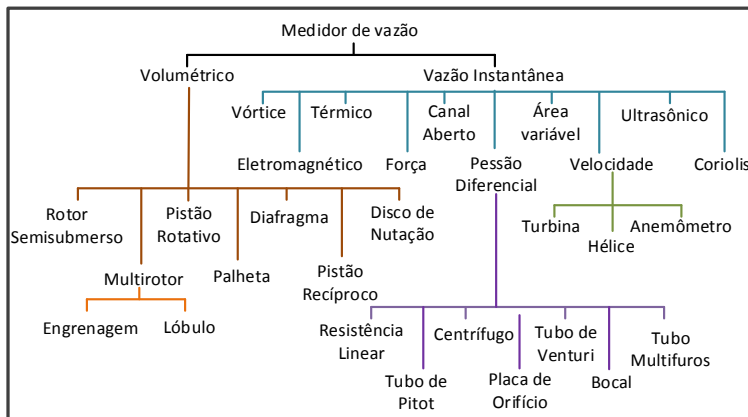
Atualmente, dispõe-se de diversas inovações nos sistemas de medição de vazão, devido à variedade de princípios físicos utilizados. Esse avanço tende a prosseguir em função das crescentes exigências das indústrias de processo e da competição entre os fabricantes.

2.3.1 Classificação dos medidores de vazão

Os medidores de vazão podem ser classificados segundo vários aspectos. Como há norma brasileira que trata do assunto, será utilizada neste trabalho a classificação da norma ABNT intitulada

“Medidores de vazão de Fluidos - Classificação” [22], mostrada na Figura 2.2.

Figura 2.2: Classificação dos medidores de vazão.



Fonte: [22]

Essa norma define medidor de vazão como “instrumento usado para medir a quantidade de fluido que escoar em um determinado elemento condutor na unidade de tempo” [22, p. 1]. A norma estabelece ainda que o medidor pode ser volumétrico (“medidor no qual o volume do fluido é determinado pelo enchimento e esvaziamento alternados de câmaras de capacidade determinada” [22, p. 1]) ou de vazão instantânea (“medidor no qual o fluido passa através do elemento primário em escoamento contínuo, fornecendo uma indicação instantânea proporcional à variação da vazão” [22, p. 2]).

Dentro da classificação dos medidores de vazão volumétricos mostrada na Figura 2.2 se tem sete tipos de medidores, os quais têm como característica comum que medem efetivamente volume e não vazão. Para que possa ser determinada a vazão volumétrica é necessário estabelecer uma razão entre a vazão medida e uma base de tempo.

Na classificação dos medidores de vazão instantânea da Figura 2.2, a característica comum entre eles é que proporcionam uma medida instantânea da vazão. Nessa categoria se encontra a maioria dos medidores comumente usados na indústria, destacando-

se entre eles os eletromagnéticos, os baseados em pressão diferencial, os tipo turbina, ultrassônicos e o Coriolis, que nos últimos anos vem ganhando expressivo mercado.

Na Tabela 2.1 se tem uma pequena descrição dos medidores de vazão da classificação mostrada na Figura 2.2.

Tabela 2.1: Descrição dos medidores de vazão da classificação NBR 10396. 1988.

| | |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Medidores volumétricos | Medidores no qual o volume do fluido é determinado pelo enchimento e esvaziamento alternados de câmaras de capacidade determinada. |
| Medidor de diafragma | Medidor no qual uma parede da câmara de medição incorpora um material flexível, deslocando quantidades determinadas de volume. |
| Medidor de palheta | Medidor no qual um rotor com palhetas móveis desloca quantidade determinada de volume. |
| Medidor de pistão rotativo | Medidor no qual um cilindro se movimenta excentricamente, deslocando quantidade determinada de volume. |
| Medidor de pistão recíproco | Medidor no qual um ou mais pistões recíprocos se deslocam em câmara de volume determinado. |
| Medidor de multirrotor | Medidor no qual dois ou mais rotores giram com movimento sincronizado, deslocando quantidade determinada de volume. |
| Medidor de disco de nutação | Medidor no qual um disco com movimento nutante desloca quantidade determinada de volume. |

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Medidor de rotor semi-submerso | Medidor no qual o rotor, semi-submerso em líquido selante, é composto de câmaras que deslocam quantidades determinadas de volume de gás. |
| Medidores de vazão instantânea | Medidores no qual o fluido passa através do elemento primário em escoamento contínuo, fornecendo uma indicação instantânea proporcional à variação da vazão. |
| Medidor de pressão diferencial | Dispositivo inserido em uma tubulação para criar uma diferença de pressão, cuja medida junto com o conhecimento das condições do fluido, da geometria do dispositivo e da tubulação permite calcular a vazão. |
| Medidor de área variável | Medidor no qual a indicação da vazão é dada pela posição de equilíbrio de uma peça móvel, introduzida em um trecho de duto de seção variável. |
| Medidor de velocidade | Medidor no qual a vazão é determinada pela rotação do elemento primário, provocada pelo escoamento do fluido. |
| Medidor de canal aberto | Medidor no qual a vazão de um líquido é determinada a partir da variação do nível, provocada por um dispositivo. |
| Medidor de força | Medidor no qual a vazão é relacionada com a força aplicada pelo fluido a um dispositivo introduzido no escoamento. |
| Medidor vórtice | Medidor que utiliza transferência de calor para o fluido como princípio de medição de vazão. |

| | |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Medidor térmico | Medidor que utiliza transferência de calor para o fluido como princípio de medição de vazão. |
| Medidor ultrassônico | Medidor que relaciona a vazão de um fluido com a variação de velocidade ou frequência de ondas ultrassônicas. |
| Medidor eletromagnético | Medidor no qual um fluido condutor se move perpendicularmente através de um campo magnético, induzindo uma força eletromotriz proporcional à velocidade de escoamento. |
| Medidor Coriolis | Medidor no qual o fluido é submetido simultaneamente a uma translação e a uma rotação, provocando uma aceleração complementar que gera uma força que depende da vazão em massa. |

Fonte: [22]

Como a variedade de medidores de vazão é numerosa, optou-se por descrever apenas dois desses princípios no presente trabalho. A escolha foi pelos medidores Coriolis, por serem os efetivamente empregados no presente trabalho, e pelos medidores do tipo turbina, por oferecerem um contraponto interessante para comparação dos métodos de medição de vazão mássica e volumétrica, com baixa incerteza de medição. Essas descrições são apresentadas nas seções 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente.

2.3.2 Princípio de funcionamento do medidor de vazão Coriolis

Nas últimas décadas, o interesse pelos medidores de vazão mássica aumentou de forma expressiva. Atualmente são muito usados nas indústrias alimentícias, químicas, farmacêuticas e petrolíferas [23]. Uma das principais vantagens desses medidores frente aos volumétricos é que eles medem diretamente a vazão em unidade de massa por unidade de tempo, sem necessidade de conversão a par-

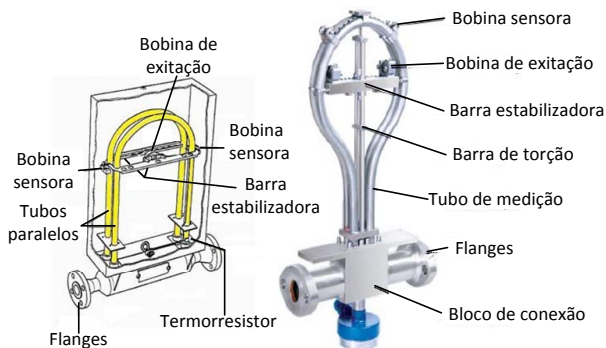
tir de vazões medidas em unidade de volume por unidade de tempo [21].

Entre os medidores de vazão mássica, os do tipo Coriolis se destacam, uma vez que são os que apresentam as menores incertezas de medição, além de apresentarem uma ampla gama de intervalos de medição [9] [24] [25].

Dependendo da aplicação, existem diversas configurações de medidores Coriolis [9]. Algumas têm um único tubo e outras dois tubos, como também podem ter os tubos retos ou curvos em forma de “S”, “W” ou “U” [26]. Na Figura 2.3 apresenta-se um medidor de tipo Coriolis com os tubos em forma de “U”.

Com a finalidade de explicar o princípio de funcionamento do medidor do tipo Coriolis, foi adotada a configuração da Figura 2.3. Como se pode observar nessa figura, a vazão da tubulação principal é dividida em duas por dois tubos paralelos em forma de “U” (tubos amarelos na Figura 2.3) que apresentam diâmetros menores que a tubulação principal. Ao fim desses tubos a vazão volta a ser conduzida por um único tubo. Os tubos são excitados permanentemente com uma frequência conhecida (frequência natural) através de uma bobina de excitação, como se mostra na Figura 2.4 do lado esquerdo. Essa excitação faz os dois tubos oscilarem em suas frequências naturais de vibração com uma pequena amplitude. O escoamento do fluido por dentro dos tubos altera a frequência natural de oscilação de forma proporcional à massa específica do fluido, como é mostrado na Figura 2.4 do lado direito. Dessa forma, a partir da frequência de oscilação é possível determinar a massa específica do fluido no interior do medidor. Além disso, a circulação da massa do fluido no interior do medidor gera uma força de Coriolis, que provoca uma torção nos tubos (fenômeno que é mostrado na Figura 2.4 do lado direito). Essa torção é captada através das bobinas sensoras acopladas nas extremidades retas dos tubos em “U” e é proporcional à vazão mássica. Essas bobinas sensoras geram tensões em formato de ondas senoidais, mostradas na Figura 2.5, sendo representado por “entrada” o sinal do sensor na entrada da tubulação do medidor e por “saída” o sinal do sensor na saída do medidor. Além disso, o sinal indicado como “resposta do medidor” é a subtração entre o sinal de saída e o sinal de entrada, que é diretamente proporcional à defasagem entre esses sinais [27].

Figura 2.3: Componentes dos medidores de vazão Coriolis.

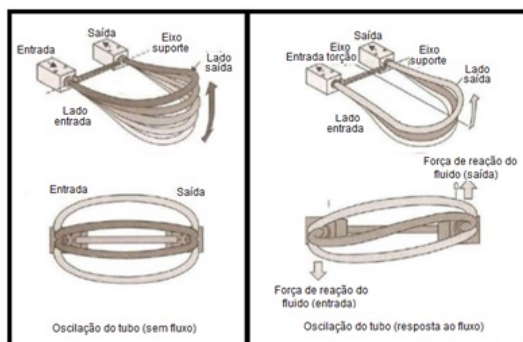


Fonte: [28], [29]

O tempo de atraso entre as duas ondas sinusoidais, medidas nas bobinas sensoras, é determinado em microssegundos e representado por Δt . Esse parâmetro é diretamente proporcional à vazão mássica, ou seja, quanto maior o Δt criado pela força Coriolis, maior a vazão mássica [9].

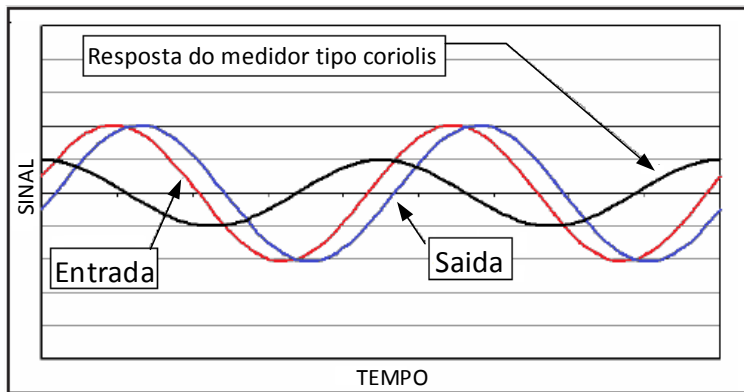
Para monitorar a temperatura é usado um termorresistor montado nos tubos em U, a fim de conhecer a temperatura do fluido para compensar as variações das deformações elásticas sofridas pelos tubos com a variação da temperatura [30].

Figura 2.4: Comportamento dos tubos com e sem vazão em um medidor do tipo Coriolis.



Fonte: [31]

Figura 2.5: Sinais detectados pelos sensores.



Fonte: [27]

Como já foi mencionado anteriormente, os medidores do tipo Coriolis nos últimos anos ganharam bastante aceitação na indústria, principalmente por causa da grande quantidade de vantagens que oferecem frente a outros métodos. Entre as principais vantagens, podem-se citar [32]:

- Sua versatilidade nas aplicações
 - Na medição de vazão mássica.
Medidores Coriolis medem a vazão em massa de líquidos ou gases diretamente.
 - Na medição de vazão volumétrica.
Medidores Coriolis medem a vazão mássica e a massa específica de maneira direta. Usando essas medições é possível determinar a vazão volumétrica com alta exatidão.
 - Nas medições multivariáveis.
Medidores Coriolis medem vazão mássica, massa específica e temperatura.
- As leituras não são afetadas por mudanças na massa específica, viscosidade, temperatura ou composição do fluido.
Segundo parte dos fabricantes, a medição fundamental de vazão não é afetada por alterações em parâmetros do fluido,

ou seja, o valor medido é independente das características do fluido que passam pelos tubos de medição.

- Para misturas de gás e líquido.
Qualquer medidor de vazão apresenta inúmeras dificuldades ao lidar com misturas de gases e líquidos. Medidores Coriolis são os mais recomendados para tal aplicação, pois podem não oferecer uma leitura exata, mas ao menos não correm risco de sofrerem danos permanentes.
- Custos de instalação.
Não há efeitos de perfil de escoamento em um medidor Coriolis, e, portanto, não há necessidade de trechos retos antes ou após o medidor. A insensibilidade ao perfil de escoamento resulta do fato de a medição não ser dependente da velocidade do fluido. Como consequência, o mesmo medidor pode ser usado para medir fluidos de alta ou baixa viscosidade, sem condicionamento de vazão ou necessidade de trechos retos.
- Não há necessidade de recalibrações constantes, pois não existem partes móveis que possam se desgastar ou quebrar.

Entre os principais limitantes, podem-se citar:

- Possui uma faixa limitada de diâmetros de tubulação.
Medidores de tipo Coriolis estão tipicamente disponíveis para aplicações em linhas de até 6 polegadas (150 mm). Há muitas aplicações nas quais os medidores são instalados em paralelo para acomodar aplicações em linhas de diâmetros maiores, porém raramente esse valor é superior a 8 polegadas ou 10 polegadas.
- O custo é elevado.
- Possui faixa de temperatura de operação limitada, sendo tipicamente disponíveis para operação de -50°C a $+350^{\circ}\text{C}$.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns dos principais fornecedores de medidores do tipo Coriolis que existem no mercado. Os preços indicados na tabela são preços do modelo de mais baixo custo de cada linha e foram estimados no país de origem, sem considerar custos de transporte.

Tabela 2.2: Características ofertadas pelos principais fornecedores de medidores de tipo Coriolis.

| Fornecedor | Marca | Diâmetro nominal | Pressão de processo | Temperatura | Modelo | Preço |
|------------------|---------------|------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------|
| Endress + Hauser | Promas | 1/24" a 10" | max 5075 psi (350 bar) | -50° C a +350° C | 8FE15- A9999ASA 910N | US\$2100,00 |
| Yokogawa | Rotamass | 1/62" a 8" | max 4134 psi (285 bar) | -200° C a +350° C | ROTAMASS | US\$2000,00 |
| EMERSON | Micro Motion | 1/2" a 3" | max 4937 psi (340 bar) | -240° C a +240° C | Modelo F | US\$2000,00 |
| KRONE | OPTIMASS 7000 | 1/2" a 4" | max 1450 psi (100 bar) | 0° C a +100° C | OPTIMASS 7000 | US\$5113,00 |

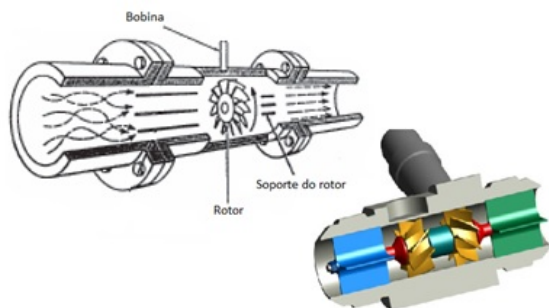
Fonte: Elaborada pela autora.

2.3.3 Princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo turbina

Os medidores de vazão do tipo turbina são medidores volumétricos de velocidade para líquidos e gases limpos, da classe geradora de pulsos, que extraem energia da vazão medida. São amplamente utilizados em processos industriais de controle, comércio de gás e outros campos, devido a sua baixa incerteza de medição e boa reprodutibilidade [14].

Um medidor de vazão tipo turbina é mostrado na Figura 2.6 e consiste basicamente em um rotor que gira a uma velocidade determinada pela velocidade do fluido e pelo ângulo das lâminas do rotor. À medida que cada lâmina passa diante de uma bobina (detector) e de um ímã, ocorre uma variação da relutância do circuito magnético e no fluxo magnético total a que está submetida a bobina [33]. Essa variação é percebida como uma variação de tensão, que é transformada em um trem de pulsos cuja frequência é proporcional à vazão. Esses pulsos em alguns casos são condicionados para serem convertidos para faixas típicas de processos industriais, como (0 a 10) V ou (4 a 20) mA. Há ainda a possibilidade de condicionar os pulsos de saída para se ter um sinal proporcional ao volume total de fluido que passou pela turbina, caracterizando os chamados totalizadores [14].

Figura 2.6: Medidor tipo turbina.



Fonte: [34], [35]

Na turbina clássica, o eixo de rotação da turbina é longitudinal ao sentido da vazão do fluido. Cada turbina possui um coeficiente de vazão K , que é o parâmetro de calibração da turbina, expresso em ciclos (pulsos) por unidade de volume. Numa turbina ideal, este valor K seria uma constante independente da viscosidade do fluido medido. Entretanto, na medida em que a viscosidade aumenta, o fator K deixa de ser uma constante e passa a ser uma função da viscosidade e da frequência de saída da turbina. Como a frequência de rotação do rotor (f) da equação (2.8) é proporcional à vazão volumétrica (Q_V) [6], pode-se escrever:

$$f = KQ_V \quad (2.8)$$

O efeito da viscosidade dos fluidos sobre o desempenho de medidores de vazão tipo turbina ainda não é totalmente compreendido para todas as situações. Segundo estudos feitos em [36], em geral o fator K das medições realizadas com um medidor de tipo turbina decresce conforme a viscosidade do fluido aumenta.

2.4 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE VAZÃO

A calibração de vazão é uma das mais necessárias e frequentes na instrumentação, embora seja também uma das mais complexas e custosas, pois envolve padrões simultâneos de massa e tempo ou de volume e tempo. Essa calibração geralmente é feita em condições de vazão que sejam hidráulicamente similares à instalação real, ou seja, com equivalência do número de Reynolds [14]. Há vários métodos disponíveis para a calibração de medidores de vazão,

mas pode-se distingui-los em duas categorias diferentes: *insitu* e no laboratório.

O fluido medido pode ser líquido ou gás. A calibração de medidores de vazão de líquidos é mais direta e fácil do que a de medidores de gases, pois o líquido pode ser armazenado em vasos abertos e a variação da massa específica com a temperatura não é tão significativa em líquidos quanto em gases.

Os principais métodos usados para calibração de medidores de vazão são:

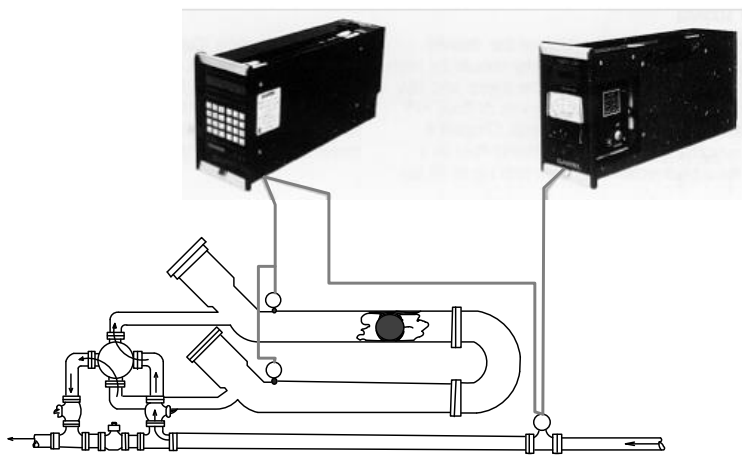
1. provador;
2. medidor mestre;
3. volumétrico;
4. gravimétrico;
5. gasômetro (somente para gases);
6. bocal sônico (somente para gases).

Nas seções 2.4.1 a 2.4.4 se apresenta uma pequena descrição dos quatro primeiros métodos de calibração. Como o foco neste trabalho não é a calibração com gases, dos dois últimos métodos foi escolhido o método do gasômetro para ser descrito na seção 2.4.5.

2.4.1 Provadores

O método de calibração com provadores tem basicamente duas configurações, o de tipo pistão ou balístico e o não balístico. O princípio de funcionamento do provador de tipo não balístico é ilustrado na Figura 2.7. Tem-se uma tubulação em forma de “U” equipada com detectores e o volume entre ambos os detectores é conhecido. Para realizar a medição é introduzida uma boia junto com o fluido e o tempo que demora a boia para se deslocar entre os detectores é proporcional à vazão, que é comparada com a medida obtida com o medidor a ser calibrado. A função dos detectores é ativar ou desativar o contador de pulsos, sendo totalizados os pulsos gerados no tempo que a boia demora para se deslocar entre os detectores [23].

Figura 2.7: Método de calibração do provador.



Fonte: [14]

Para obter bons resultados com este método é importante ter o cuidado de que não existam vazamentos no ramo da tubulação entre o provador e o medidor a ser calibrado, justamente para evitar que se tenha uma variação no volume.

Para o emprego do método, tipicamente 10000 pulsos são escolhidos na indústria do petróleo para assegurar que a incerteza introduzida pela resolução de pulso seja inferior a 0,01% e, portanto, seja insignificante [37].

Por outro lado, o provador balístico utiliza um pistão acionado pneumaticamente percorrendo um tubo de precisão e deslocando um volume de fluido de calibração através do medidor de vazão a ser calibrado [7].

O provador com pistão é útil para medidores com pequena constante de tempo, como turbinas. Nos medidores com resposta rápida, a vazão atinge o estado de regime permanente muito rapidamente e a integração da vazão instantânea para obter o volume total é conseguida pela totalização dos pulsos da saída em um contador. A integração fornece uma vazão total com boa exatidão mesmo que a vazão não esteja perfeitamente constante.

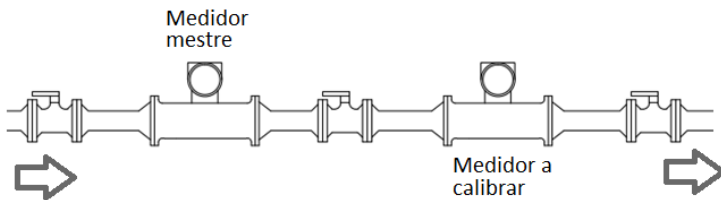
Existem soluções comerciais de provadores, sendo os principais fornecedores: Daniel Measurement and Control (Emerson) (mos-

trado na Figura 2.7), Calibron Systems e Brooks [37].

2.4.2 Medidor mestre

Nesta técnica é usado como padrão de calibração um medidor de incerteza conhecida e previamente calibrado, chamado de medidor mestre. O medidor a ser calibrado e o medidor mestre são conectados em série, como se mostra na Figura 2.8, de modo que a mesma vazão de regime passe pelos dois medidores. Para garantir uma calibração consistente e exata, o medidor mestre também deve ser recalibrado periodicamente, rastreado a outro de menor incerteza. Este outro padrão também deve ser rastreado com outro superior, seguindo a cadeia de rastreabilidade metrológica de padrões [38]. O instrumento mestre típico para padrão de vazão é o Coriolis, que rastreado pode oferecer incertezas de até $\pm 0,05\%$ do valor medido.

Figura 2.8: Medidor mestre e medidor a ser calibrado em serie.



Fonte: Adaptado de [39]

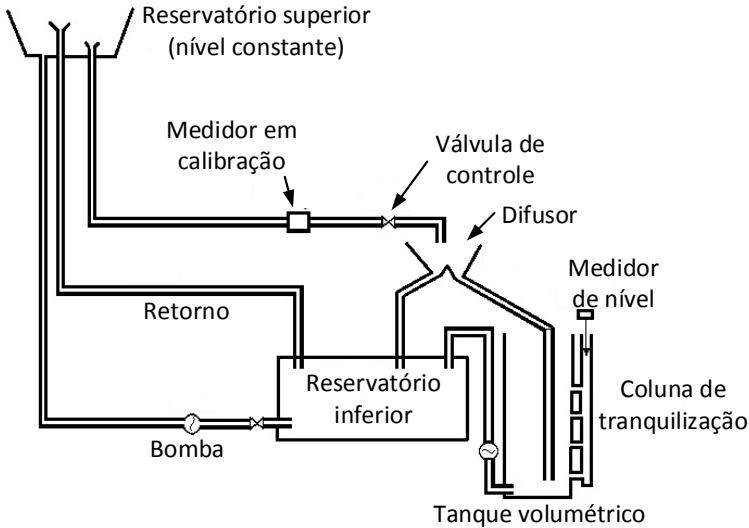
2.4.3 Método volumétrico

Consiste em calibrar o medidor, confrontando o valor medido com o volume determinado pelo nível de um tanque volumétrico de calibração em função do tempo. O princípio do método, de acordo com a norma ISO 8316 (1987) [40] e mostrado na Figura 2.9, consiste em:

1. determinar o volume inicial do tanque volumétrico;
2. desviar a vazão com o difusor para o tanque volumétrico e zerar o cronômetro;

3. determinar o volume final contido no tanque volumétrico.

Figura 2.9: Método de calibração volumétrica.



Fonte: [40]

A vazão volumétrica é determinada pela razão do volume coletado (dV) em função do tempo de aquisição (dt), como se mostra na equação (2.9), onde V_i é o volume que se tem ao iniciar a coleta e V_f é o volume obtido finalizando a coleta, t_i é o tempo de início de ensaio e t_f o tempo final do ensaio. Esse valor é então comparado com o valor indicado pelo medidor em calibração.

$$Q_V = \frac{dV}{dt} = \frac{(V_f - V_i)}{(t_f - t_i)} \quad (2.9)$$

A estrutura usada no método volumétrico de calibração é mostrada na Figura 2.9. Nesse método é preciso que a topologia interna do tanque volumétrico seja conhecida ou que seja realizado algum ensaio que permita determinar a capacidade volumétrica deste.

Alguns fluidos, especialmente os que têm alta viscosidade (acima de 10 cSt), podem ficar aderidos nas paredes do tanque,

gerando mudanças significativas no volume e modificando o tempo de drenagem. A quantidade imprevisível de fluido aderido nas paredes acaba gerando problemas nas incertezas e na repetibilidade [37].

O tempo de drenagem é definido como o tempo necessário para esvaziar o tanque adotando-se um fluido de referência. Geralmente esse dado é encontrado no certificado de calibração do tanque. Esse tempo é próprio de cada um, já que depende das constantes de contração e dilatação do material e das características do desenho da área de drenagem do mesmo. As modificações nesse tempo indicam indícios de variação no volume, o que pode ser efeito da existência de fluido aderido nas paredes do tanque.

Outro fator que deve ser levado em conta é a temperatura, que produz contração ou dilatação tanto no fluido de trabalho como no tanque [37].

2.4.4 Método gravimétrico

É um método de calibração em que o medidor a ser calibrado tem o seu valor de indicação confrontado com o valor em massa determinado por uma balança ou célula de carga em função do tempo [14].

Na calibração de vazões líquidas, o método de calibração gravimétrica tipicamente fornece os melhores níveis de incerteza. Para realizar esse tipo de calibração, existem dois tipos possíveis de mensurandos [12]:

- média da vazão mássica

$$\bar{Q}_m = \frac{m_{REF}}{t_{MED}} \quad (2.10)$$

- massa totalizada

$$m = \int_0^{t_{MED}} Q_m(t) dt = \bar{Q}_m \cdot t_{MED} \quad (2.11)$$

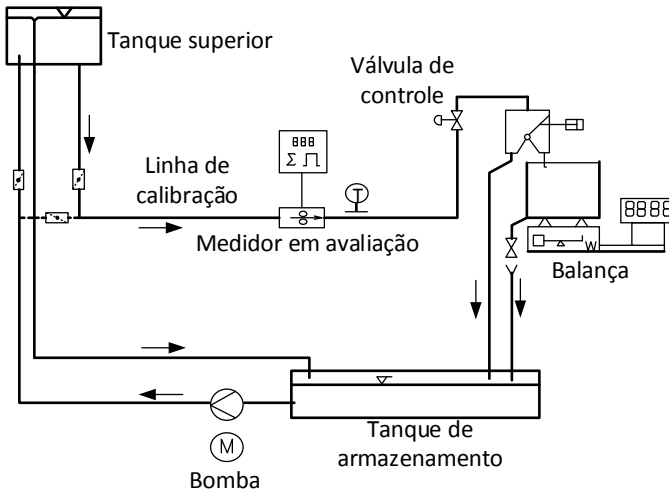
onde:

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| m_{REF} | massa de referência (massa coletada, determinada pela pesagem); |
| t_{MED} | tempo medido (período de coleta). |

O princípio do método gravimétrico, de acordo com a norma ISO 4185 (1980) [41], é observado na Figura 2.10 e consiste em:

1. determinar a massa inicial (m_i) do tanque de pesagem;
2. desviar a vazão com o difusor para o tanque de pesagem;
3. determinar a massa final (m_f) contida no tanque.

Figura 2.10: Método de calibração gravimétrico.



Fonte: [41]

No método gravimétrico de calibração, a viscosidade e temperatura não são fatores críticos, mas uma consideração necessária a ser levada em conta é o fator do ajuste no valor do peso do fluido coletado. Essa correção deve ser realizada uma vez que o peso sofre influência do efeito do empuxo do ar. Por esse motivo, tipicamente esse fator de ajuste é denominado fator de correção do empuxo. As balanças geralmente são calibradas usando pesos de massa específica convencional (8 g/cm^3) e o fluido coletado terá uma massa específica significativamente diferente, portanto sentirá o efeito do empuxo do ar para cima. Essa diferença é significativa e corresponde a cerca de 0,1% para a água. Como forma de compen-

sar esse efeito, a equação para o cálculo da massa é apresentada em (2.12) [37].

$$m = w \left[1 + \rho_{\text{ar}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{fluido}}} - \frac{1}{\rho_{\text{pesos}}} \right) \right] \quad (2.12)$$

onde:

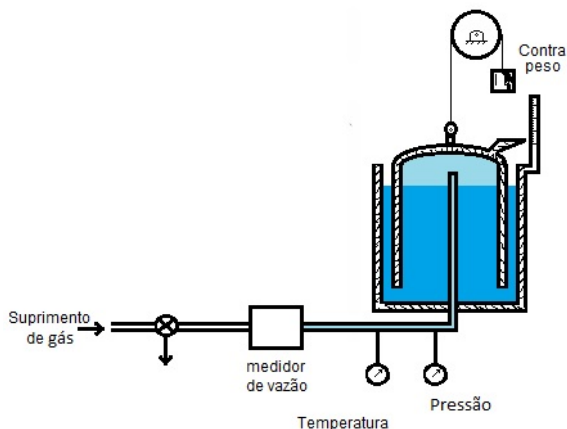
| | |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| m | massa indicada pela balança; |
| w | valor verdadeiro convencional da massa; |
| ρ_{ar} | massa específica do ar; |
| ρ_{fluido} | massa específica do fluido coletado; |
| ρ_{pesos} | massa específica das massas padrão empregadas na calibração. |

2.4.5 Gasômetro

Em alguns casos, a calibração de medidores de vazão de gases pode ser feita com líquidos, desde que sejam mantidas iguais algumas condições de contorno, como o número de Reynolds, e feitas as devidas correções de massa específica e expansão. Quando isso não é aceitável, usa-se a calibração direta com o próprio gás. No caso de gases a altas pressões muitas vezes é possível empregar outros métodos, como o gravimétrico, porém em outros casos devem ser empregados gasômetros.

O esboço de um gasômetro é mostrado na Figura 2.11 e uma imagem real na Figura 2.12. A campânula do gasômetro, como se pode observar na Figura 2.11, tem o topo fechado e a parte inferior aberta. Quando o gás é acumulado dentro da campânula, esta sobe. A quantidade de gás capturado e o volume são proporcionais à distância deslocada pela campânula.

Figura 2.11: Estrutura de um gasômetro.



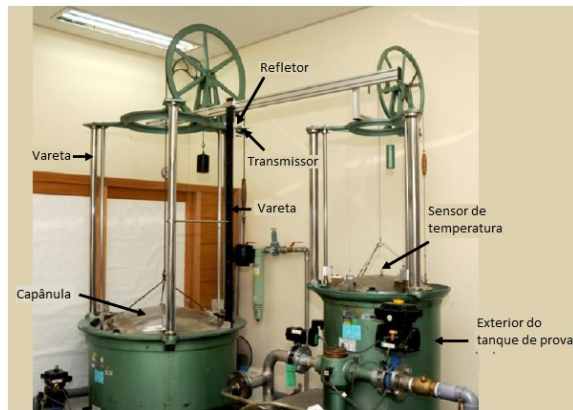
Fonte: [14]

A distância percorrida é medida por fora da campânula. Para isso, uma das opções é o uso um interferômetro laser, como se mostra na Figura 2.12, onde é possível observar a posição do refletor e do transmissor do interferômetro laser. Uma vez determinado o deslocamento da campânula, esse valor é multiplicado pela área da capela, de modo a obter o volume deslocado. Um contrapeso está ligado ao gasômetro, como se observa nas Figuras 2.11 e 2.12, e serve para tentar manter constante a pressão dentro da campânula, evitando que parte do deslocamento da campânula deixe de ser realizado e se transforme em elevação de pressão no interior da mesma [42].

Na Figura 2.12 pode-se perceber que há duas campânulas de distintas dimensões. A maior é de $0,6 \text{ m}^3$ e a menor de $0,2 \text{ m}^3$. Ambas são parte do Instituto Nacional de Medição da Coreia, KRISS [42]. Nesta figura também se pode observar que no exterior das campânulas há três varetas, cuja finalidade é evitar que a campânula balance quando se movimenta.

Os gasômetros são utilizados como padrões primários para a medição volumétrica de vazão de gás em muitos Institutos Nacionais de Medida (NMI, do inglês *National Measurement Institutes*).

Figura 2.12: Gasômetro.



Fonte: [42]

3 DESENVOLVIMENTO DO PRIMEIRO PROTÓTIPO DE BANCADA

Como forma de avaliar o conceito de bancada de calibração proposto e subsidiar propostas de melhoria para a versão final, foi construída uma versão preliminar de bancada. Neste capítulo serão detalhados o método de calibração escolhido, juntamente com os equipamentos e procedimentos utilizados nessa bancada.

3.1 SELEÇÃO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

O método de calibração escolhido para ser implementado na bancada de calibração é o método gravimétrico. Como é descrito em [41], esse método exige três operações básicas:

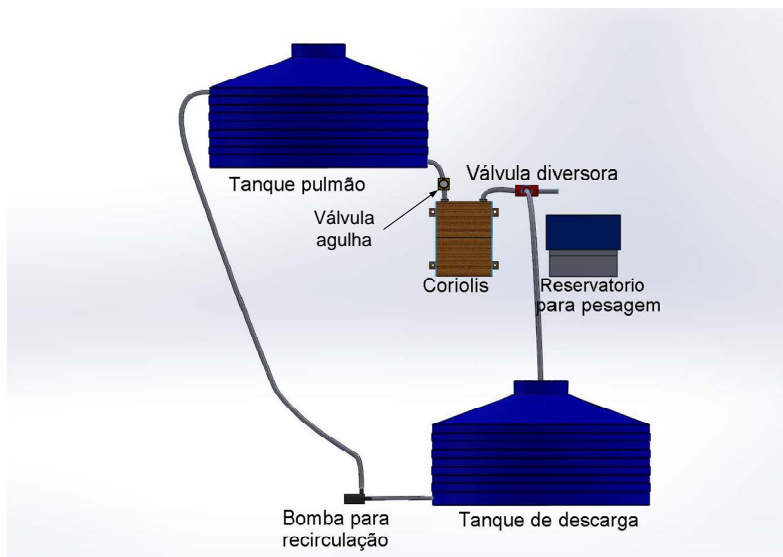
- realizar uma pesagem estática para determinar o valor da massa inicial do recipiente de pesagem;
- ativar uma válvula diversora para desviar a vazão para o tanque de pesagem (até que seja considerado que se tenha a quantidade de massa suficiente para atingir a incerteza desejada), acionando simultaneamente um temporizador para medir o tempo de enchimento;
- determinar a massa final do recipiente de pesagem mais o líquido coletado.

A escolha desse método foi feita pelo desempenho que pode ser atingido com ele. De acordo com [12], o método gravimétrico é o que possui os melhores valores de incerteza para a calibração de vazões de líquidos, dado que esse método requer apenas a medição de massa e tempo.

3.1.1 Estrutura mecânica do primeiro protótipo de bancada

Para a montagem do primeiro protótipo de bancada de calibração foi seguida a norma ISO 4185 [41]. Uma renderização de um projeto esquemático da bancada é apresentada na Figura 3.1. Há dois tanques, um tanque superior, que consiste no tanque pulmão, encarregado de alimentar o sistema com a vazão mais constante possível, e um tanque inferior, denominado tanque de armazenamento ou tanque de descarga, encarregado de armazenar o fluido que sai do sistema de medição para ser bombeado para o tanque pulmão.

Figura 3.1: Esquema de montagem do primeiro protótipo de bancada.



Fonte: Autor

O medidor de vazão sob avaliação é alimentado pelo tanque pulmão. Na saída do medidor de vazão encontra-se a válvula diversora, encarregada de deixar passar o fluido para o tanque de descarga ou para o reservatório de pesagem. Neste protótipo não foi usada a válvula diversora e há necessidade de um operador realizar manualmente o posicionamento da mangueira de saída do medidor Coriolis para o tanque de descarga ou para o reservatório de pesagem.

Com a finalidade de manter a vazão de saída no tanque pulmão constante, viu-se a necessidade de usar uma válvula agulha na entrada do medidor de vazão, com a qual a vazão de saída do tanque pulmão é regulada manualmente, tentando obter uma vazão constante para realizar o ensaio.

Na seção 3.2 serão detalhados os principais componentes do primeiro protótipo de bancada, mostrado na Figura 3.1.

3.2 DESCRIÇÃO E SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO PRIMEIRO PROTÓTIPO

Para a montagem do primeiro protótipo foram empregados os seguintes componentes:

- medidor de vazão mássica tipo Coriolis (usado como padrão, na posição do medidor sob avaliação);
- balança semi-analítica;
- tanques de 10 litros;
- mangueiras;
- recipiente para pesagem;
- sistema de aquisição de dados.

Os itens empregados são descritos em detalhes nas seções 3.2.1 a 3.2.5.

3.2.1 Medidor de vazão tipo Coriolis

O medidor de vazão não é um componente da bancada de calibração. Aproveitando as características que esse tipo de medidor possui, foi empregado com a finalidade de avaliar as medições obtidas com a bancada. Por esta razão, na sequência serão apresentadas as especificações do medidor de vazão empregado.

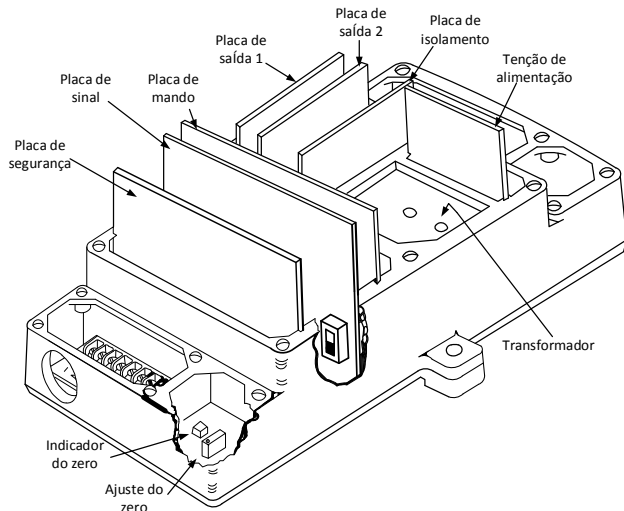
O medidor de vazão utilizado é do tipo Coriolis da marca Micro Motion, do tipo Mass Flow Meter. Esse equipamento é formado por um sensor e uma unidade eletrônica remota (REU, do inglês *Remote Electronic Unit*). O sensor de vazão mássica e de massa específica é do modelo D6S-SS. Possui especificações metrológicas melhores que as tipicamente apresentadas por instrumentos de medição de vazão. O fabricante afirma que o desempenho na medição não é afetado com mudanças na viscosidade, condutividade ou perfil do escoamento do fluido, além de afirmar que o equipamento possui compensação para os efeitos causados por variações de temperatura. O sensor está configurado para trabalhar com uma vazão mássica máxima de 0,25 kg/min, com uma incerteza na medição de 0,2% do fundo de escala, além de ± 00001 kg/min da estabilidade do zero [43].

A REU conjuntamente com o sensor de vazão mássica formam um medidor de vazão completo. As características técnicas da REU são mostradas na Tabela 3.1.

De acordo com informações do fabricante, as calibrações nesses equipamentos feitas em fábrica têm rastreabilidade direta com os padrões do Bureau Nacional Norte-Americano [44].

A REU é formada por sete placas, como se mostra na Figura 3.2. A placa de tensão de alimentação contém os fusíveis de proteção e através de um transformador encapsulado converte a tensão de alimentação de 110 V para 25 V(CA). A placa de comando condiciona os 25 V através de uma ponte de diodos para retificar e regular os 25 V a dois sinais de corrente contínua: -15 V e +15 V. A placa de segurança proporciona uma barreira de segurança entre a REU e o sensor, de modo que o sensor possa ser instalado em áreas sujeitas a explosões ou que contenham fluidos inflamáveis. A REU conta com duas placas de saída, sendo uma para frequência e outra para proporcionar uma saída analógica.

Figura 3.2: Unidade Eletrônica Remota.



Fonte: [44]

A placa de comando e a placa de sinal detectam o sinal do detector de posição esquerdo para regular o amplificador de potência responsável pela oscilação do tubo de medição, controlando a

Tabela 3.1: Especificações técnicas da REU.

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exatidão | $\pm 0,2\%$ do intervalo de medição \pm estabilidade do zero (em conjunto com o sensor) |
| Estabilidade do zero | 0,0001 kg/min |
| Temperatura de operação | -40°C a $+55^{\circ}\text{C}$ |
| Tempo de resposta | Ajustável de (0,1 a 1,1) s |

Fonte: [44]

amplitude de oscilação [44].

Os sensores de posição esquerdo e direito detectam a defasagem entre as extremidades do tubo de medição, que é provocada pela vazão. Esses sinais são amostrados, filtrados e amplificados antes de serem enviados ao cartão de comando, que calcula a vazão mássica instantânea.

Para o processamento dos dados obtidos com esse medidor foi usado o sinal de saída da placa 2, que está configurado como saída em tensão de 0 V a 5 V.

3.2.2 Balança

A balança é um dos componentes mais importantes na bancada, já que os dados da massa do fluido obtidos com o medidor sob análise são comparados com os valores obtidos com a balança. A balança usada neste protótipo é uma balança eletrônica semi-analítica da marca MARTE Série UX6200H, mostrada na Figura 3.3.

Uma balança eletromagnética opera pelo princípio de compensação eletromagnética, que é o utilizado pela maioria dos fabricantes de balanças de precisão. Nesse sistema, uma bobina (através da indução eletromagnética) equilibra uma alavanca. Em uma das pontas da alavanca está a bobina e na outra o prato de pesagem, sobre o qual é depositada a massa que se pretende avaliar. A corrente necessária para reestabelecer o equilíbrio do sistema é proporcional ao peso aplicado ao prato, que por sua vez é proporcional à massa que se pretende medir. O processador observa o valor dessa corrente e o converte em um valor de massa [46].

O sistema de conversão de massa em sinal elétrico (sistema

Figura 3.3: Balança semi-analítica marca MARTE serie UX6200H.



Fonte: [45]

Tabela 3.2: Especificações da balança.

| | |
|------------------------------|---------------|
| Capacidade | 6200 g |
| Exatidão | 0,01 g |
| Repetibilidade | $\leq 0,01$ g |
| Linearidade | $\pm 0,02$ g |
| Tempo de resposta (s) | 1,5 a 2,5 |
| Interface de E/S | RS-232C |

Fonte: [45]

alavanca – bobina) é todo metálico e, conseqüentemente, sofre variações com a temperatura. Como forma de contornar esse problema, a balança utilizada na bancada possui uma peça única de alumínio denominada UniBloc Shimadzu. Essa tecnologia foi introduzida pela Shimadzu e proporciona melhoras na velocidade da resposta, estabilidade às mudanças de temperatura e alta durabilidade [45].

Na bancada, a balança está localizada logo após a válvula diversora, a qual esta após o medidor de vazão mássica Coriolis. Dessa forma, a balança realiza a medição da massa de todo o fluido que atravessa o medidor. Os dados obtidos com a balança são enviados para o computador através de uma interface serial RS-232.

A balança utilizada possui as características detalhadas na Tabela 3.2.

3.2.3 Bomba de recirculação

A bomba usada para a recirculação do fluido no sistema é uma moto-bomba de corrente contínua proporcional da marca DRIFT mostrada na Figura 3.4. Esse tipo de bomba é encontrado no mecanismo responsável pela limpeza de parabrisas em automóveis e também nos sistemas de partida a frio em automóveis flex, tendo, portanto, grande oferta no mercado a preços acessíveis. A tensão de operação pode variar entre 0 V e 12 V, com uma corrente de aproximadamente 3,5 A na máxima tensão de alimentação.

Figura 3.4: Moto-Bomba DC.



Fonte: Autor

3.2.4 Tanques

Nesta bancada foram utilizadas como tanques duas garrafas PET de 10 litros, iguais à mostrada na Figura 3.5.

Figura 3.5: Garrafa PET de 10 litros.



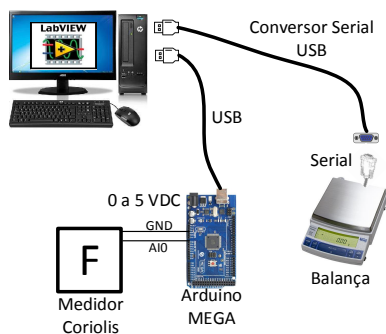
Fonte: Autor

Uma das garrafas é usada como tanque de descarga (encarregado de receber o fluido da válvula diversora ou do recipiente de passagem) e a segunda como tanque pulmão (responsável pelo fornecimento do fluido para o medidor de vazão Coriolis).

3.2.5 Sistema de aquisição dos dados

Para a aquisição e processamento dos dados foi empregado Labview como ambiente de desenvolvimento do supervisor, com a arquitetura mostrada na Figura 3.6. Como o transmissor de vazão mássica empregado possui saída diretamente em tensão no intervalo de 0 V a 5 V, foi empregada uma entrada analógica de um Arduino Mega 2560. Além disso, como a balança tem saída no padrão RS-232 foi empregado um conversor de RS-232 para USB, visto que o computador usado no projeto não possui portas seriais como padrão RS-232.

Figura 3.6: Comunicação entre o Labview, o medidor Coriolis e a balança.



Fonte: Autor

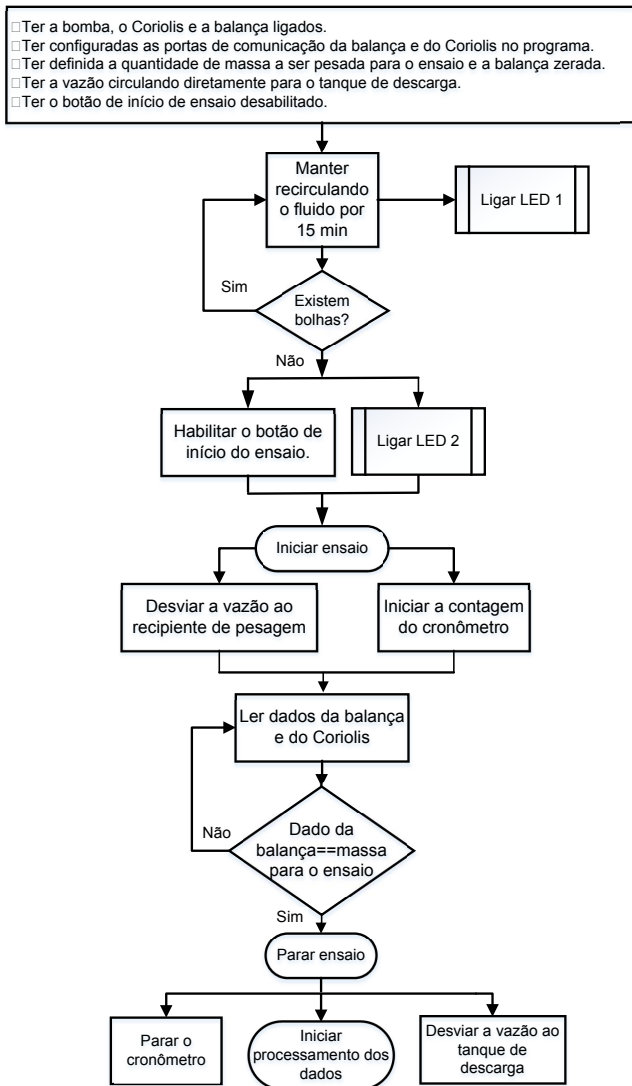
Neste primeiro protótipo o sistema supervisor é usado para indicar para o operador quando deve realizar a mudança de posicionamento da mangueira de saída do medidor Coriolis e adquirir e processar a comparação entre os dados obtidos pelo medidor em avaliação e pela balança. Além de monitorar as variáveis do processo, o supervisor gera um relatório com os dados obtidos no ensaio. A lógica usada no supervisor é a mostrada na Figura 3.7. Para iniciar o programa é preciso ter a bomba, o transdutor sob avaliação e a balança ligados para conseguir ter as portas de

comunicação já identificadas, de modo que possam ser definidas no sistema supervisorio desenvolvido. Além disso, é necessário ter a vazão circulando diretamente para o tanque de descarga. Para integrar o Arduino com o Labview está sendo usada uma biblioteca do Labview chamada LINX, do fabricante MakerHub. Essa biblioteca permite a conexão do Labview com as placas Arduino de forma bastante transparente ao usuário.

Uma vez que tenham sido cumpridas as condições iniciais mencionadas acima e que o usuário tenha definido a massa de fluido que pretende empregar para validação do sistema de medição sob avaliação, pode-se rodar o programa. Como pode-se observar na Figura 3.7, o fluxograma inicia mantendo, durante 15 min, o sistema ligado simplesmente circulando o fluido. Esse procedimento é necessário para eliminar possíveis bolhas de ar aderidas à tubulação e por recomendação da Micro Motion, fabricante do transdutor sob avaliação, que estipula o tempo de *warmup* do transdutor Coriolis de 15 min. Para indicar que os 15 min foram cumpridos, um LED de sinalização é ligado. Uma vez que se confirme manualmente que não há mais bolhas no escoamento através do acionamento de um botão na interface gráfica por parte do usuário, um segundo LED é ligado e o botão de início de ensaio é habilitado.

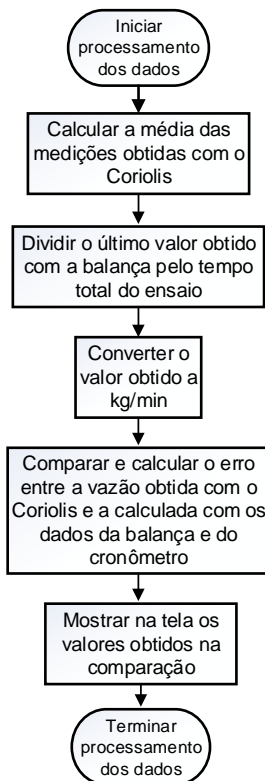
Ao pressionar o botão de início de ensaio o cronômetro inicia a contagem e o usuário deve manualmente movimentar a mangueira de saída do medidor Coriolis do tanque de descarga para o reservatório de pesagem. O programa é mantido dentro deste ciclo até que o dado obtido da balança seja igual ao valor definido como massa de referência para o ensaio. Uma vez atingido o valor de referência de massa, a leitura dos dados de massa e o cronômetro são interrompidos e a vazão é desviada para o tanque de descarga novamente. Depois de encerrar o ensaio, tem início o procedimento de processamento dos dados e geração automática de relatório. Para o processamento dos dados, a lógica usada é a mostrada na Figura 3.8.

Figura 3.7: Lógica usada no SCADA.



Fonte: Autor

Figura 3.8: Lógica para o processamento dos dados no supervisor.



Fonte: Autor

Durante a fase de processamento dos dados, calcula-se uma média das medições obtidas como o Coriolis e, conhecendo que a vazão mássica é a relação entre a massa coletada e o período de coleta, como foi descrito em (2.10), pode-se calcular a vazão dividindo o último valor obtido com a balança pelo tempo total do ensaio, uma vez que ocorre uma compensação da massa do recipiente vazio.

Para realizar a comparação com a vazão medida com o Coriolis é importante levar em conta as unidades, uma vez que as unidades usadas no Coriolis estão em quilogramas por minuto e que o tempo é medido em milissegundos e a massa em gramas.

O processamento dos dados conclui mostrando na tela os valores obtidos na comparação entre a vazão calculada e a vazão obtida com o Coriolis, empregado como padrão.

3.3 RESULTADOS

Na Figura 3.9 mostram-se os tanques da bancada implementada conjuntamente como o medidor de vazão padrão e a bomba usada para a recirculação do fluido usado no ensaio (água). Optou-se por fazer os ensaios com água dado que o medidor padrão disponível também havia sido calibrado com água. Na Figura 3.10 mostram-se a balança, o reservatório usado para a pesagem e a válvula agulha usada para regular a vazão.

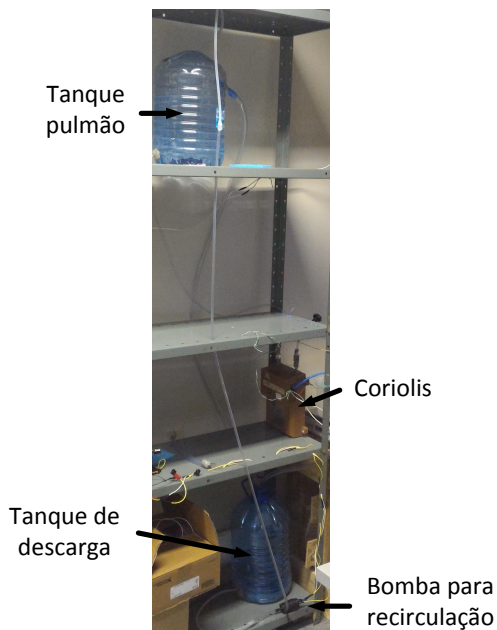
Como pode ser observado nas Figuras 3.9 e 3.10, o equipamento com maior custo é a balança, visto que os demais componentes da bancada são materiais reciclados ou de baixo custo. Nesta implementação não foi usada uma válvula diversora, sendo que o trabalho do diversor foi realizado manualmente.

Os ensaios foram realizados em torno de quatro diferentes valores de vazão, que estão compreendidos no intervalo de (0,06 a 0,095) kg/min, equivalente a (3,6 a 5,7) kg/h. Para todos os ensaios mostrados na Tabela 3.3 a quantidade de massa usada está na faixa dos 600 g. O fluido usado para todos os ensaios foi água.

A análise dos resultados iniciou com um estudo do tipo da dinâmica que apresentam as medições realizadas com a bancada em comparação com a dinâmica das medições feitas com o medidor Coriolis. Neste estudo, descobriu-se que a dinâmica das medições feitas com a bancada é mais lenta que a dinâmica das medições com o Coriolis. Por essa razão, realizar a comparação dos resultados das medições iniciando em um tempo zero não tinha mais sentido. Dessa forma, para a análise dos resultados está sendo considerada a região na qual as leituras de ambos os métodos estão em regime permanente. Na Figura 3.11, mostra-se o comportamento dinâmico das medições de um dos ensaios realizados, evidenciando a diferença nos comportamentos dinâmicos. No caso da Figura 3.11 a região considerada para comparação dos resultados é representada pelos instantes de tempo localizados após 290 s.

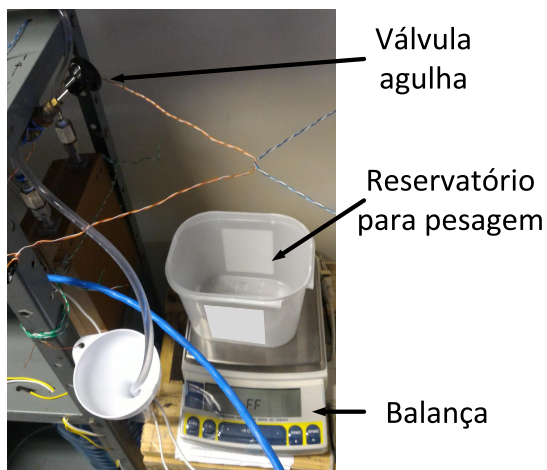
Outro fator que foi levado em consideração na análise dos dados é a compensação da diferença de massa específica entre a água e as massas com as quais foi feita a calibração da balança. O cálculo deste fator de compensação é feito com a equação (2.12).

Figura 3.9: Tanques, bomba e Coriolis da bancada implementada.



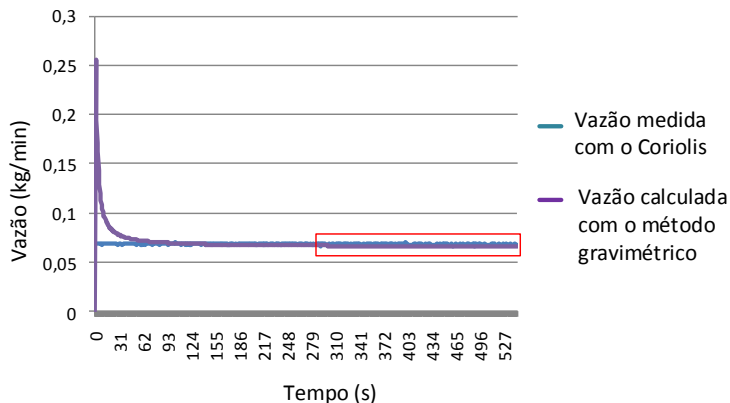
Fonte: Autor

Figura 3.10: Balança e reservatório para pesagem da bancada implementada.



Fonte: Autor

Figura 3.11: Dinâmica do processo de medição.



Fonte: Autor

Os resultados da Tabela 3.3 foram obtidos levando em conta essas duas considerações. O principal dado de análise na Tabela 3.3 é o valor do erro em porcentagem. Esse valor foi obtido com a comparação entre o valor de vazão mássica indicado pelo medidor de vazão Coriolis e o valor de vazão mássica inferido a partir da massa medida pela balança e do tempo medido pelo cronômetro. Pode-se observar que os valores dos erros obtidos se encontram perto uns dos outros, indicando que os resultados dos ensaios estão repetitivos e reprodutivos. Essa é uma característica metrológica muito importante para a avaliação do desempenho da bancada, pois indica que a bancada é capaz de reproduzir valores de interesse próximos uns dos outros ao se alterarem os parâmetros e condições adotados nos respectivos ensaios. Dessa forma, apesar da existência de uma parcela sistemática de erro ligeiramente superior a 1,3%, a parcela aleatória tem amplitude bastante inferior a esse valor.

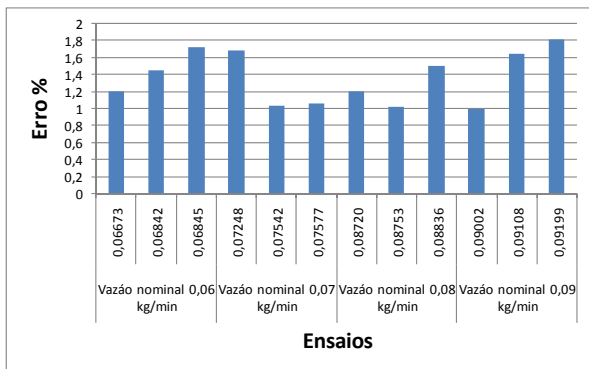
Tabela 3.3: Resultados dos ensaios com o primeiro protótipo de bancada.

| Ensaio | Q_m Coriolis (kg/min) | Q_m Método gravimétrico (kg/min) | Erro (%) |
|--------|-------------------------|------------------------------------|----------|
| 1 | 0,06673 | 0,06496 | 1,21 |
| 2 | 0,06845 | 0,06646 | 1,73 |
| 3 | 0,06842 | 0,06677 | 1,45 |
| 1 | 0,07577 | 0,07374 | 1,06 |
| 2 | 0,07248 | 0,07076 | 1,69 |
| 3 | 0,07542 | 0,07332 | 1,03 |
| 1 | 0,08720 | 0,08469 | 1,20 |
| 2 | 0,08836 | 0,08587 | 1,51 |
| 3 | 0,08753 | 0,08527 | 1,02 |
| 1 | 0,09002 | 0,08754 | 0,99 |
| 2 | 0,09199 | 0,08840 | 1,81 |
| 3 | 0,09108 | 0,08867 | 1,65 |

Fonte: Autor

Analisando os dados dos erros obtidos nos ensaios, tem-se que o erro médio equivale a 1,36% (8,20 g) com um desvio padrão de 0,3% (1,90 g). Na Figura 3.12, são apresentados os erros em porcentagem obtidos nos ensaios realizados com a bancada para cada uma das quatro faixas de vazão mostradas na Tabela 3.3. Nessa figura pode-se perceber que os valores de erro encontram-se abaixo de 2%.

Figura 3.12: Curva de erros.



Fonte: Autor

Para complementar a análise dos resultados obtidos com o primeiro protótipo de bancada foi realizada uma avaliação das principais fontes de incerteza de medição presentes tanto na bancada quanto no transdutor empregado para efeitos de comparação. Essa avaliação, apresentada nas seções 3.3.1 e 3.3.2, permite uma comparação mais clara dos resultados apresentados pelos diferentes métodos de medição e permite identificar as fontes que mais contribuem para a composição da incerteza de medição do protótipo de bancada desenvolvido.

3.3.1 Avaliação das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico

A palavra *incerteza* significa *dúvida*. Dessa forma, *incerteza da medição* significa *dúvida nos resultado de uma medição*. Formalmente, define-se incerteza como: “*parâmetro, associado com o resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando*” [47, p. 44].

Para a avaliação das incertezas da medição de vazão mássica obtida com o método gravimétrico partiu-se da função de medição mostrada em (2.10), onde a vazão mássica, Q_m , é a relação entre a variação de massa, Δm , e a variação de tempo, Δt , como se mostra em (3.1).

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_f - m_i}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Como forma de organizar a apresentação dos resultados, optou-se por dividir a avaliação da incerteza em três etapas: avaliação das incertezas na medição de massa (seção 3.3.1.1), avaliação das incertezas na medição de tempo (seção 3.3.1.2) e combinação das duas parcelas (seção 3.3.1.3).

3.3.1.1 Avaliação das incertezas nas medições de massa feitas com a balança

Para a avaliação das incertezas nas medições de massa inicial e final foram seguidos oito passos, como sugerido em [38].

P1-Análise do processo de medição

- Definição do mensurando (DM). O mensurando é a massa de água.
- Procedimento de medição (PM). Para realizar a medição primeiro se tem que verificar se a balança se encontra corretamente nivelada. Antes de iniciar a pesagem é importante zerar a balança com o recipiente de passagem sobre ela. Tendo a balança zerada pode-se iniciar a pesagem e o envio de dados para o computador.
- Condições Ambientais (CA). A balança opera em um ambiente sem controle de temperatura. Como os ensaios do primeiro protótipo foram feitos com água, foi realizado um teste com a finalidade de verificar a quantidade de água evaporada por unidade de tempo na temperatura ambiente. O teste consistiu em deixar sobre a balança um certo período de tempo uma quantidade de massa de água conhecida em um recipiente aberto. A duração do teste foi de aproximadamente 22 h, tendo início às 15:16 h e fim às 12:18 h do dia seguinte. A massa inicial foi de 700,41 g e no final do teste se tinha 686,24 g. Dessa forma, constatou-se uma evaporação de 14,17 g de massa de água evaporada no período de duração do teste, o que representa 0,00001073 kg/min de água evaporada.
- Operador (O). Neste processo se procurou minimizar a participação do operador com o uso do supervisor que é quem comanda o ensaio. Entretanto, como nessa bancada não foi usada uma válvula diversora, foi preciso incorporar um operador para esse trabalho. A fonte de in-

certeza gerada com a incorporação do operador influencia principalmente nos primeiros e nos últimos dados medidos, que é quando efetivamente ocorre a interação do operador com o ensaio. Assim, como forma, de minimizar a influência do operador, esses dados são descartados para a análise dos resultados, fazendo com que a incerteza causada pelo operador na medição de massa seja desprezível.

- Sistema de medição (SM). Balança semi-analítica.

P2 - Fontes de incertezas

1. Repetibilidade da balança ($Re_B = 0,01$ g) [45].
2. Resolução da balança ($R_B = 0,01$ g) [45].
3. Linearidade da balança ($lin = 0,02$ g) [45].
4. Coeficiente de temperatura na sensibilidade da balança ($dT = 3$ ppm/°C) [45]. Tendo em consideração que a referência de temperatura para determinação da sensibilidade da balança é 20°C e que no pior dos casos a temperatura nos ensaios variou de 15°C a 25°C, tem-se uma variação máxima na temperatura de $\pm 5^\circ\text{C}$, ou $dT = 0,000015\Delta m$.

Existem outras fontes de incerteza, cujos efeitos são minimizados pelo procedimento de medição adotado, mas que têm que ser mencionadas. Entre elas estão:

- Evaporação. Considerando um ensaio para um valor de massa de água de 600 g, que em média é realizado em aproximadamente 8 min, ou seja, com uma vazão mássica de 0,075 kg/min, a parcela de erro que a evaporação acrescenta é de 0,00001073 kg/min, equivalente a 0,014%. Com este cálculo pode-se constatar que esta fonte de incerteza é desprezível frente às demais fontes e optou-se por desprezá-la para realizar a avaliação da incerteza para este primeiro protótipo.
- Comportamento dinâmico das medições. Esta fonte incerteza representa uma parcela bastante considerável. Para minimizar seu efeito, são considerados apenas os dados da região onde ambos métodos de medição encontram-se em condição de regime permanente.

- Vibração. Este fenômeno pode afetar em grande medida as medições, mas para minimizar os efeitos da vibração nas medições, teve-se o cuidado de isolar a balança da bomba e do resto da bancada.
- Inclinação. O grau de inclinação da balança afeta as medições, mas para minimizar os efeitos dessa fonte de incerteza a balança possui um indicador de nível (uma bolha de nível) através do qual pode-se verificar se a balança encontra-se corretamente nivelada. No procedimento de medição adotado define-se que tem que ser assegurado antes de cada ensaio que a balança esteja corretamente nivelada. Com este procedimento conseguem-se minimizar os efeitos desta fonte de incerteza.

P3 - Estimativa da correção

1. A repetibilidade da balança e a resolução trazem apenas componentes aleatórias, não possíveis de serem corrigidas.
2. O efeito do empuxo do ar para cima, será compensado com base na equação (2.12).
3. A repetibilidade da vazão mássica nos ensaios traz componentes aleatórias, não possíveis de serem corrigidas.

P4 - Correção combinada É calculada pela soma algébrica das correções estimadas para cada fonte de incertezas. Neste caso, a correção combinada é nula, dado que o efeito do empuxo já foi previamente compensado.

P5 - Incertezas padrão A equação para a determinação da parcela de incerteza referente à resolução, considerando uma distribuição retangular $a = R$, é apresentada na equação (3.2).

$$\begin{aligned} u_{R_B} &= \frac{R}{\sqrt{3}} \\ v_{R_B} &= \infty \end{aligned} \quad (3.2)$$

Por segurança, optou-se por assumir que existe igual probabilidade de os valores verdadeiros convencionais da grandeza medida estarem no intervalo dado por $\pm \text{lin}$ em torno da melhor reta que descreve o comportamento da balança. Dessa forma, foi considerada uma distribuição retangular para a incerteza da linearidade, como mostrado em (3.3). Por se tratar

de um dado de catálogo, foram assumidos infinitos graus de liberdade associados a essa informação.

$$\begin{aligned} u_{lin} &= \frac{lin}{\sqrt{3}} \\ v_{lin} &= \infty \end{aligned} \quad (3.3)$$

Assumindo que o dado da repetibilidade é dado por uma distribuição normal para 95% das indicações, a equação da incerteza é mostrada em (3.4), também com infinitos graus de liberdade.

$$\begin{aligned} u_{Re_B} &= \frac{Re_B}{2} \\ v_{Re_B} &= \infty \end{aligned} \quad (3.4)$$

Já que não se tem informação sobre o tipo de distribuição do coeficiente de temperatura na sensibilidade, por segurança foi adotado que a incerteza no coeficiente de temperatura na sensibilidade possui uma distribuição retangular, como ilustrado em (3.5).

$$\begin{aligned} u_{dT} &= \frac{dT}{\sqrt{3}} \\ v_{dT} &= \infty \end{aligned} \quad (3.5)$$

P6 - Incerteza padrão combinada É calculada a partir da combinação quadrática das incertezas padrão de cada fonte de incertezas. A incerteza instrumental da massa é detalhada na equação (3.6). Deve-se notar que como se trata de uma diferença de massas, as parcelas de repetibilidade, resolução e linearidade foram consideradas duas vezes, pois afetam tanto a medição da massa inicial quanto final, sendo assumido por segurança que não existe correlação entre as medições. A parcela da deriva com temperatura foi considerada apenas uma vez, assumindo que a variação de temperatura entre as medições inicial e final pode ser desprezada.

$$u_{I_m} = \sqrt{2u_{Re_B}^2 + 2u_{R_B}^2 + 2u_{lin}^2 + u_{dT}^2} \quad (3.6)$$

P7 - Graus de liberdade efetivos (v_{ef}) É calculado a partir dos valores do número de graus de liberdade da incerteza padrão de cada fonte de incerteza, como se mostra em (3.7).

$$\frac{u_{I_m}^4}{v_{ef}} = 2 \frac{u_{Re_B}^4}{v_{Re_B}} + 2 \frac{u_{R_B}^4}{v_{R_B}} + 2 \frac{u_{lin}^4}{v_{lin}} + \frac{u_{dT}^4}{v_{dT}} \quad (3.7)$$

Sabendo que os graus de liberdade da repetibilidade, resolução linearidade e do coeficiente de temperatura da balança são infinitos, então:

$$v_{ef} = \infty \quad (3.8)$$

P8- Incerteza expandida É calculada com base na incerteza combinada a partir da equação (3.9), onde t é o coeficiente de Student correspondente ao número de graus de liberdade efetivos a 95,45% de probabilidade.

$$U_{I_m} = t \cdot u_{I_m} \quad (3.9)$$

Na sequência são apresentados os resultados dos cálculos obtidos para as incertezas na medição de massa.

Para o cálculo do fator de compensação de massa para o efeito do empuxo do ar, foi considerado que a massa específica do ar é $1,2041 \text{ kg/m}^3$, a massa específica do fluido (água) é $998,2 \text{ kg/m}^3$ e a massa específica dos pesos usados para calibrar a balança é 8000 kg/m^3 [48]. Aplicando esses dados em (2.12), os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 3.4, agrupados por vazão nominal do ensaio. Nas colunas 3 e 4 mostram-se os valores das massas final e inicial mais o fator de compensação para o efeito do empuxo do ar. Na última coluna apresentam-se os valores da variação de massa.

As parcelas de incerteza associadas a resolução, equação (3.2), linearidade, equação (3.3), e repetibilidade, equação (3.4), da balança são mostradas na Tabela 3.5.

Os resultados do cálculo da incerteza do coeficiente de temperatura dT , equação (3.5), são mostrados na Tabela 3.6.

Com os dados das tabelas anteriores pode-se proceder com o cálculo da incerteza padrão da massa (3.6), os graus de liberdade efetivos (3.8) e a incerteza expandida (3.9). Esses resultados são apresentados na Tabela 3.7.

Como pode-se observar na Tabela 3.7, o valor dos graus de liberdade é infinito, portanto o coeficiente t de Student usado para um intervalo de confiança de 95,45% é 2 [38].

3.3.1.2 Avaliação das incertezas na medição de tempo

Para a avaliação das incertezas nas medições de tempo, foram seguidos os mesmos oito passos usados para o cálculo das incertezas nas medições de massa.

Tabela 3.4: Cálculo do fator de compensação para o efeito do empuxo do ar para cima.

| m_f (g) | m_i (g) | $m_f +$ empuxo (g) | $m_i +$ empuxo (g) | Δm (g) |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 600,85 | 309,54 | 601,48 | 309,54 | 291,62 |
| 601,21 | 309,25 | 601,85 | 309,25 | 292,27 |
| 602,82 | 317,13 | 603,46 | 317,13 | 285,10 |
| 602,17 | 338,97 | 602,81 | 338,97 | 263,48 |
| 605,13 | 287,08 | 605,77 | 287,08 | 318,39 |
| 602,52 | 351,55 | 603,16 | 351,55 | 251,23 |
| 602,02 | 333,93 | 602,66 | 333,93 | 268,37 |
| 603,45 | 336,29 | 604,09 | 336,29 | 267,44 |
| 602,04 | 281,08 | 602,68 | 281,38 | 321,30 |
| 603,78 | 314,79 | 604,42 | 314,79 | 289,29 |
| 601,38 | 319,81 | 602,01 | 319,81 | 281,87 |
| 601,05 | 378,89 | 601,68 | 407,81 | 193,44 |

Fonte: Autor

Tabela 3.5: Incertezas da repetibilidade, resolução e linearidade da balança.

| Parâmetro | Valor (g) | u (g) | v |
|------------|-----------|---------|----------|
| R_B (g) | 0,01 | 0,0058 | ∞ |
| Re_B (g) | 0,01 | 0,0050 | ∞ |
| lin (g) | 0,02 | 0,0115 | ∞ |

Fonte: Autor

P1-Análise do processo de medição

- Definição do mensurando (DM). O mensurando é o tempo decorrido entre as medições inicial e final da massa.
- Procedimento de medição (PM). A contagem do tempo deve estar sincronizada com o desvio da vazão. O tempo total é contabilizado desde o instante em que a vazão é desviada para o recipiente de pesagem até que retorna para o tanque de descarga. Para a análise dos resultados é considerada a variação no tempo na região em que am-

Tabela 3.6: Incerteza do coeficiente de temperatura dT .

| dT (g) | u_{dT} (g) | v_{dT} |
|----------|--------------|----------|
| 0,0044 | 0,0025 | ∞ |
| 0,0044 | 0,0025 | ∞ |
| 0,0043 | 0,0025 | ∞ |
| 0,0040 | 0,0023 | ∞ |
| 0,0048 | 0,0028 | ∞ |
| 0,0038 | 0,0022 | ∞ |
| 0,0040 | 0,0023 | ∞ |
| 0,0040 | 0,0023 | ∞ |
| 0,0048 | 0,0028 | ∞ |
| 0,0043 | 0,0025 | ∞ |
| 0,0042 | 0,0024 | ∞ |
| 0,0033 | 0,0017 | ∞ |

Fonte: Autor

Tabela 3.7: Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida da variação na massa.

| u_{I_m} (g) | v_{ef} | U_{I_m} (g) |
|---------------|----------|---------------|
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0198 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0198 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |
| 0,0197 | ∞ | 0,04 |

Fonte: Autor

bos métodos de medição encontram-se em condição de regime permanente.

- Condições Ambientais (CA). As condições ambientais são desprezíveis, pois para efeitos práticos desta dissertação a temperatura não influencia na medição do tempo.
- Operador (O). Neste processo foi minimizada a participação do operador com o uso do supervisor que é quem comanda o ensaio. Assim, essa fonte de incerteza é desprezível.
- Sistema de medição (SM). O sistema de medição usado é a base de tempo de um contador do supervisor. Este possui uma resolução de 1 ms.

P2 - Fontes de incertezas Entre as principais podem-se mencionar as seguintes:

1. Resolução do contador de tempo ($R_C = 0,001$ s).
2. Incerteza na sincronização para a aquisição dos dados. A aquisição dos dados da massa é realizada a cada um segundo então, no pior dos casos teríamos 2 s de variação do tempo total do ensaio em relação ao tempo correto.

Algumas outras fontes de incerteza são:

- A aquisição dos dados é realizada com o Labview. Com a finalidade de evitar a perda dos dados, é preciso que exista sincronia entre o envio e a recepção destes. Para isso é usado o contador de tempo do Labview. As variações na frequência são uma fonte de incerteza que pode afetar a sincronia na aquisição dos dados. Para minimizar os efeitos das variações na frequência o Labview possui um conjunto de programas internos que seguem a norma IEEE 1588 [49].
- A variação de tempo entre a leitura do valor de massa e a leitura do tempo. Esta variação na pior das hipóteses é 1 s, que é o período de amostragem da balança empregada.

P3 - Estimativa da correção A resolução traz componentes aleatórias, não possíveis de serem corrigidas, que é o período de amostragem da balança empregada.

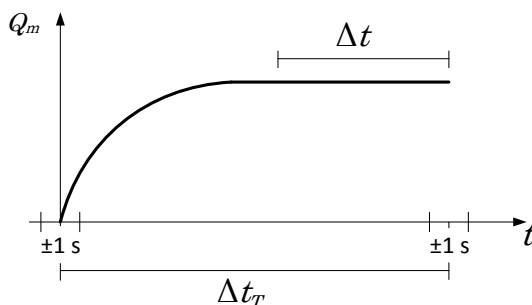
P4 - Correção combinada É calculada pela soma algébrica das correções estimadas para cada fonte de incertezas. Neste caso, a correção combinada é nula.

P5 - Incertezas padrão

Para a avaliação da incerteza na medição do tempo foi feita a seguinte análise. Na Figura 3.13, mostra-se a curva característica da resposta da medição de vazão mássica em relação ao tempo. Como os dados são amostrados em intervalos de 1 s, na pior das hipóteses teríamos um erro de ± 1 s na leitura dos valores da massa e do tempo no início do ensaio e ± 1 s nas leituras no fim do ensaio. Dessa forma, na pior das hipóteses, no tempo total do ensaio (Δt_T) poderíamos ter um erro de ± 2 s. Por outro lado, como os dados estão sendo analisados na região de regime permanente, a incerteza procurada é a referente à variação do tempo na região em regime (Δt). Com base nesta análise, chegamos na seguinte relação:

$$\frac{\Delta t}{u_t} = \frac{\Delta t_T}{2}$$

Figura 3.13: Relação entre o tempo total do ensaio e o tempo em regime.



Fonte: Autor

Desta relação, encontramos que a parcela de incerteza referente à medição de tempo na região em regime é a mostrada

em (3.10).

$$\begin{aligned} u_t &= \frac{2\Delta t}{\Delta t_T} \\ v_t &= n - 1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

A equação para a determinação da parcela de incerteza referente à resolução considerando uma distribuição retangular com $a = R$ é apresentada na equação (3.11).

$$\begin{aligned} u_{RC} &= \frac{RC}{\sqrt{3}} \\ v_{RC} &= \infty \end{aligned} \quad (3.11)$$

P6 - Incerteza padrão combinada Calculada com a equação (3.12).

$$u_{\Delta t} = \sqrt{u_t^2 + u_{RC}^2} \quad (3.12)$$

P7 - Graus de liberdade efetivos (v_{ef}) É calculado com a equação (3.13).

$$\frac{u_{\Delta t}^4}{v_{ef}} = \frac{u_t^4}{v_t} + \frac{u_{RC}^4}{v_{RC}} \quad (3.13)$$

Sabendo que o grau de liberdade da resolução do contador de tempo é infinito, então temos que os graus de liberdade efetivos são calculados com (3.14).

$$v_{ef} = \frac{u_{\Delta t}^4 v_t}{u_t^4} \quad (3.14)$$

P8- Incerteza expandida Calculada com a equação (3.15), onde t é o coeficiente de Student correspondente ao número de graus de liberdade efetivos a 95,45% de probabilidade.

$$U_C = t \cdot u_{\Delta t} \quad (3.15)$$

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos obtidos para as incertezas na variação no tempo. Na Tabela 3.8, mostram-se os resultados dos cálculos das incertezas na medição do tempo na região de regime (u_t) (3.10). As parcelas de incerteza associadas à resolução do contador de tempo (3.11) são apresentadas na Tabela 3.9.

Comparando os valores das incertezas de cada uma das fontes, pode-se observar que a fonte de incertezas com menor peso

Tabela 3.8: Incerteza para a medições do tempo na região de regime.

| Δt (min) | Δt_T (min) | u_t (s) | u_t (min) |
|---------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| 4,5829 | 9,4333 | 0,9716 | 0,0162 |
| 4,4997 | 9,1833 | 0,9800 | 0,0163 |
| 4,3992 | 9,2500 | 0,9512 | 0,0159 |
| 3,7145 | 8,5667 | 0,8672 | 0,0145 |
| 4,4008 | 8,4167 | 1,0457 | 0,0174 |
| 3,4806 | 8,3333 | 0,8353 | 0,0139 |
| 3,2315 | 7,2500 | 0,8915 | 0,0149 |
| 3,1981 | 7,2167 | 0,8863 | 0,0148 |
| 3,8011 | 7,1500 | 1,0632 | 0,0177 |
| 3,3492 | 7,0333 | 0,9524 | 0,0159 |
| 3,2500 | 6,9167 | 0,9398 | 0,0157 |
| 2,2441 | 6,9333 | 0,6473 | 0,0108 |

Fonte: Autor

Tabela 3.9: Incerteza da resolução do contador de tempo.

| R_C (s) | u_{R_C} (s) | u_{R_C} (min) |
|--------------|------------------|--------------------|
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,0010 | 0,00058 | 9,62E-6 |

Fonte: Autor

é a incerteza da resolução do contador. Com os dados das Tabelas 3.8 e 3.9, pode-se proceder com o cálculo da incerteza padrão combinada. Esses resultados conjuntamente com os graus de liberdade efetivos e a incerteza expandida são apresentados na Tabela 3.10. Já que o número de graus de liberdade efetivos na medição de tempo é infinito, o coeficiente t de Student usado para um intervalo de confiança de 95,45% é 2 [38].

Tabela 3.10: Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida da variação no tempo.

| $u_{\Delta t}$ (min) | v_{ef} | $U_{\Delta t}$ (min) |
|-------------------------|----------|-------------------------|
| 0,0162 | ∞ | 0,032 |
| 0,0163 | ∞ | 0,033 |
| 0,0159 | ∞ | 0,032 |
| 0,0145 | ∞ | 0,029 |
| 1,0174 | ∞ | 0,035 |
| 0,0139 | ∞ | 0,028 |
| 0,0149 | ∞ | 0,030 |
| 0,0148 | ∞ | 0,030 |
| 1,0177 | ∞ | 0,035 |
| 0,0159 | ∞ | 0,032 |
| 0,0157 | ∞ | 0,031 |
| 0,0108 | ∞ | 0,022 |

Fonte: Autor

3.3.1.3 Avaliação das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico

Como já foi mencionado na equação (2.2), a vazão mássica é o quociente entre a variação na massa e a variação no tempo. Dessa forma, para calcular a incerteza instrumental da vazão mássica é preciso aplicar a equação da incerteza padrão da divisão, mostrada em (3.16).

$$\frac{u(I_{Q_m})}{\Delta m / \Delta t}^2 = \frac{u(I_m)}{\Delta m}^2 + \frac{u(\Delta t)}{\Delta t}^2 \quad (3.16)$$

A incerteza instrumental da vazão mássica obtida com o método gravimétrico ($u_{I_{Q_m}}$) é igual à incerteza do quociente entre a incerteza instrumental da massa e a variação no tempo ($u(\frac{\Delta m}{\Delta t})$). Para o cálculo de $u_{I_{Q_m}}$ são usados para Δt os dados da Tabela 3.8, para Δm os dados da Tabela 3.4, para $u(\Delta t)$ os dados da Tabela 3.10 e para $u_{(I_m)}$ os dados da Tabela 3.7. Os graus de liberdade efetivos são calculados com a equação (3.17).

$$\frac{u_{I_{Q_m}}^4}{v_{ef}} = \frac{u_{I_m}^4}{v_{I_m}} + \frac{u_{\Delta t}^4}{v_{\Delta t}} \quad (3.17)$$

Na Tabela 3.11, são apresentados os resultados da avaliação da incerteza instrumental da vazão mássica conjuntamente com a incerteza expandida.

Tabela 3.11: Incerteza instrumental padrão e incerteza instrumental expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

| $u_{I_{Q_m}}$ (g/min) | $U_{I_{Q_m}}$ (g/min) | $U_{I_{Q_m}}$ (kg/min) |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0,0610 | 0,1221 | 0,0001 |
| 0,0627 | 0,1255 | 0,0001 |
| 0,0617 | 0,1233 | 0,0001 |
| 0,0640 | 0,1280 | 0,0001 |
| 0,0713 | 0,1426 | 0,0001 |
| 0,0643 | 0,1285 | 0,0001 |
| 0,0761 | 0,1522 | 0,0002 |
| 0,0763 | 0,1527 | 0,0002 |
| 0,0842 | 0,1684 | 0,0002 |
| 0,0813 | 0,1627 | 0,0002 |
| 0,0816 | 0,1633 | 0,0002 |
| 0,0681 | 0,1363 | 0,0001 |

Fonte: Autor

A repetibilidade da vazão mássica e a repetibilidade da vazão mássica instantânea nos ensaios são fontes de incerteza que compõem a incerteza padrão combinada da medição de vazão. A incerteza da repetibilidade da vazão mássica obtida com o método gravimétrico nos ensaios é calculada com a equação (3.18), onde n é o número de ensaios, I_i é a indicação obtida no ensaio i e \bar{I} é a

média das indicações. Na Tabela 3.12, são apresentados os resultados da incerteza da repetibilidade da vazão mássica. Nessa tabela pode-se observar que a menor parcela de incerteza foi obtida para os últimos três ensaios.

$$\begin{aligned} u_{ReQ_{mG}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \\ v_{ReQ_{mG}} &= n - 1 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Tabela 3.12: Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica.

| m (kg) | t (min) | Q_{mG} (kg/min) | \bar{Q}_{mG} (kg/min) | $u_{ReQ_{mG}}$ (kg/min) |
|-------------|--------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0,2913 | 4,5829 | 0,0636 | 0,0645 | 0,00078 |
| 0,2920 | 4,4997 | 0,0649 | | |
| 0,2857 | 4,3992 | 0,0649 | | |
| 0,2632 | 3,7145 | 0,0709 | 0,0717 | 0,00077 |
| 0,3181 | 4,4008 | 0,0723 | | |
| 0,2510 | 3,4806 | 0,0721 | | |
| 0,2681 | 3,2315 | 0,0830 | 0,0836 | 0,00075 |
| 0,2672 | 3,1981 | 0,0835 | | |
| 0,3210 | 3,8011 | 0,0844 | | |
| 0,2890 | 3,3492 | 0,0863 | 0,0863 | 0,00027 |
| 0,2816 | 3,2500 | 0,0866 | | |
| 0,1932 | 2,2441 | 0,0861 | | |

Fonte: Autor

A incerteza da repetibilidade da vazão mássica instantânea ($u_{ReQ_{miG}}$) é dada pelo desvio-padrão das diversas medições ao longo de um ensaio dividido pela raiz quadrada do número de medições em regime em cada ensaio, uma vez que se está interessado na incerteza da média desses diversos valores. Esses resultados são apresentados na Tabela 3.13. Dessa forma, a incerteza padrão combinada da vazão mássica obtida com o método gravimétrico é calculada com a equação (3.19). Como $v_{I_{Q_m}} = \infty$, então para o cálculo dos graus de liberdade da vazão mássica a equação resultante é mos-

trada em (3.20).

$$u_{Q_{mG}} = \sqrt{(u_{I_{Q_m}})^2 + (u_{Re_{Q_{mG}}})^2 + (u_{Re_{Q_{miG}}})^2} \quad (3.19)$$

$$\frac{u_{Q_{mG}}^4}{v_{ef}} = \frac{u_{I_{Q_m}}^4}{v_{I_{Q_m}}} + \frac{u_{Re_{Q_{mG}}}^4}{v_{Re_{Q_{mG}}}} + \frac{u_{Re_{Q_{miG}}}^4}{v_{Re_{Q_{miG}}}}$$

$$v_{ef} = \frac{u_{Q_{mG}}^4 v_{Re_{Q_{mG}}} v_{Re_{Q_{miG}}}}{u_{Re_{Q_{mG}}}^4 v_{Re_{Q_{miG}}} + u_{Re_{Q_{miG}}}^4 v_{Re_{Q_{mG}}}} \quad (3.20)$$

Tabela 3.13: Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica instantânea.

| $Re_{Q_{miG}}$ (kg/min) | $u_{Re_{Q_{miG}}}$ (kg/min) | v_{ef} |
|----------------------------|--------------------------------|----------|
| 0,00021 | 1,28E-5 | 563 |
| 0,00022 | 1,35E-5 | 548 |
| 0,00018 | 1,08E-5 | 552 |
| 0,00003 | 1,91E-5 | 511 |
| 0,00012 | 7,35E-6 | 502 |
| 0,00018 | 1,28E-5 | 497 |
| 0,00026 | 1,89E-5 | 432 |
| 0,00022 | 1,60E-5 | 430 |
| 0,00019 | 1,28E-5 | 426 |
| 0,00015 | 1,07E-5 | 419 |
| 0,00032 | 2,30E-5 | 414 |
| 0,00014 | 1,22E-5 | 413 |

Fonte: Autor

Na Tabela 3.14, são apresentados os resultados dos cálculos das parcelas de incerteza padrão e a incerteza expandida associadas à vazão mássica, obtida com o método gravimétrico. Esses resultados são apresentados em g/min, unidades usadas nos resultados anteriores. Como as unidades dos dados obtidos com o Coriolis estão em kg/min, na Tabela 3.14 também são apresentados os resultados em kg/min, isso com a finalidade de realizar a comparação dos resultados obtidos entre o Coriolis e o método gravimétrico.

Por último, na Tabela 3.15, são apresentadas as vazões mássicas obtidas com o método gravimétrico com suas respectivas parcelas de incertezas.

Tabela 3.14: Incertezas padrão e expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

| $u_{Q_{m_G}}$ (g/min) | $U_{Q_{m_G}}$ (g/min) | $U_{Q_{m_G}}$ (kg/min) |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0,7813 | 3,5371 | 0,0035 |
| 0,7815 | 3,5377 | 0,0035 |
| 0,7813 | 3,5372 | 0,0035 |
| 0,7751 | 3,5090 | 0,0035 |
| 0,7758 | 3,5121 | 0,0035 |
| 0,7753 | 3,5096 | 0,0035 |
| 0,7495 | 3,3932 | 0,0034 |
| 0,7495 | 3,3930 | 0,0034 |
| 0,7503 | 3,3965 | 0,0034 |
| 0,2808 | 1,2710 | 0,0013 |
| 0,2816 | 1,2748 | 0,0013 |
| 0,2773 | 1,2553 | 0,0013 |

Fonte: Autor

Tabela 3.15: Vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

| Vazão nominal (kg/min) | Q_{m_G} (kg/min) | $U_{Q_{m_G}}$ (kg/min) |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 0,06 | 0,066 | 0,004 |
| | 0,068 | 0,004 |
| | 0,068 | 0,004 |
| 0,07 | 0,072 | 0,004 |
| | 0,075 | 0,004 |
| | 0,076 | 0,004 |
| 0,08 | 0,087 | 0,003 |
| | 0,087 | 0,003 |
| | 0,088 | 0,003 |
| 0,09 | 0,090 | 0,001 |
| | 0,091 | 0,001 |
| | 0,092 | 0,001 |

Fonte: Autor

3.3.2 Avaliação das incertezas na medição da vazão mássica com o Coriolis

Para a análise das incertezas nas medições de vazão mássica com o Coriolis, foram seguidos os mesmos oito passos usados para a avaliação das incertezas nas medições de massa e tempo. Dessa forma, alguns detalhes que se repetem da análise realizada na seção 3.3.1 serão suprimidos.

P1-Análise do processo de medição

- Definição do mensurando (DM). Vazão mássica.
- Procedimento de medição (PM). Antes de realizar as medições com o transdutor Coriolis é preciso verificar que as tubulações estão completamente cheias. Depois, deve-se ter por 15 min o equipamento ligado com vazão circulando por ele, isso por recomendação do fabricante para eliminação de possíveis bolhas de ar e para assentamento da temperatura da eletrônica (tempo de *warmup*). Tendo cumprido esse tempo deve-se verificar a não existência de bolhas nas tubulações, para, com isso, iniciar o ensaio.
- Condições Ambientais (CA). As condições ambientais empregadas nos ensaios não interferem na medição da vazão mássica com o transdutor empregado [43].
- Operador (O). No procedimento de medição da vazão mássica como o Coriolis não existe a intervenção do operador.
- Sistema de medição (SM). Medidor de vazão mássica tipo Coriolis.

P2 - Fontes de incertezas Entre as principais, podem ser mencionadas as seguintes:

1. Estabilidade do zero no Coriolis ($E_z = 0,0001 \text{ kg/min}$) [44].
2. Erro combinado do Coriolis ($E_c = 0,2\%$ do fundo de escala) [44].

$$E_c = \frac{0,25 \cdot 0,2}{100} = 0,0005 \text{ kg/min}$$

3. Incerteza da placa de aquisição (R_p), dada pela combinação de:

- resolução da placa de aquisição de dados (R_{pA}), que é de 10 bits (Arduino Mega) [50];

$$R_{pA} = \frac{5 - 0}{2^{10} - 1} = 4,888 \text{ mV}$$

- erro máximo no conversor A/D (C_{ad}) (2 bits);
- incerteza da referência de tensão (R_v) empregada no conversor, que depende da qualidade da fonte de alimentação do computador e das resistências dos cabos e trilhas, visto que pode haver atenuação da tensão de alimentação devido às componentes resistivas. Como não se dispõe do valor de variação apresentado pela fonte empregada nem das resistências de cabos e trilhas, será assumido que as perdas nos cabos são desprezíveis e será usado o valor de tolerância tipicamente apresentado pelos fabricantes de fontes de computador, que é de $\pm 5\%$ (0,25 V) [51].

Dessa forma, a parcela da resolução associada à placa de aquisição é dada pela composição quadrática de R_{pA} , C_{ad} e R_v , como se mostra na equação (3.21), uma vez que não há correlação entre as parcelas e que todas possuem infinitos graus de liberdade.

$$R_p = \sqrt{R_{pA}^2 + C_{ad}^2 + R_v^2}$$

$$R_p = \sqrt{0,004888^2 + (2 \cdot 0,004888)^2 + 0,25^2} = 0,25 \text{ V} \quad (3.21)$$

Tendo em consideração que para 0,25 kg/min de vazão tem-se uma tensão de 5 V, então 0,25 V representa uma vazão de 0,0125 kg/min.

4. Repetibilidade nos ensaios feitos com o Coriolis.

Algumas outras fontes de incerteza são:

- A vibração causada pela bomba pode influenciar nas medições feitas com o Coriolis. Para minimizar os efeitos dessa fonte de incerteza a bomba é isolada da estrutura onde o Coriolis está instalado.
- A existência de bolhas nas tubulações interfere nas medições feitas com o Coriolis. Para minimizar os efeitos dessa

fonte de incerteza adotou-se no procedimento de medição a condição de um tempo de recirculação de 15 min e a verificação da não existência de bolhas nas tubulações antes de iniciar os ensaios.

- O fato de não ter a tubulação cheia influencia nas medições do Coriolis. Para minimizar esta fonte de incerteza se teve o cuidado de instalar o Coriolis seguindo as recomendações do fabricante, de modo a minimizar a formação de bolhas.

P3 - Estimativa da correção Não foram identificadas parcelas sistemáticas possíveis de corrigir.

P4 - Correção combinada Neste caso, a correção combinada é nula.

P5 - Incertezas padrão A parcela da incerteza padrão referente à estabilidade do zero (u_{E_z}), considerando uma distribuição retangular, é dada pela equação (3.22).

$$\begin{aligned} u_{E_z} &= \frac{Ez}{\sqrt{3}} \\ v_{E_z} &= \infty \end{aligned} \quad (3.22)$$

A parcela da incerteza padrão referente ao erro combinado do Coriolis (u_{E_c}), tendo em consideração uma distribuição normal, é dada pela equação (3.23).

$$\begin{aligned} u_{E_c} &= \frac{Ec}{2} \\ v_{E_c} &= \infty \end{aligned} \quad (3.23)$$

A parcela de incerteza referente à placa de aquisição (u_{R_p}), considerando uma distribuição retangular, é apresentada na equação (3.24).

$$\begin{aligned} u_{R_p} &= \frac{Rp}{\sqrt{3}} \\ v_{R_p} &= \infty \end{aligned} \quad (3.24)$$

Em (3.25), mostra-se a equação para o cálculo da parcela de incerteza referente à repetibilidade nos ensaios realizados com o Coriolis.

$$\begin{aligned} u_{Re_{EC}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \\ v_{Re_{EC}} &= n - 1 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Na Tabela 3.16, são apresentados os resultados dos cálculos obtidos para as parcelas de incertezas e os graus de liberdade nas medições com o Coriolis.

Tabela 3.16: Incerteza padrão e graus de liberdade na medição de vazão com o Coriolis.

| Parâmetro | Valor (kg/min) | u (kg/min) | ν |
|-----------|----------------|--------------|----------|
| E_z | 0,00010 | 0,00006 | ∞ |
| E_c | 0,00050 | 0,00025 | ∞ |
| R_p | 0,0125 | 0,00072 | ∞ |

Fonte: Autor

P6 - Incerteza padrão combinada Calculada com a equação (3.26).

$$u_{Q_{mC}} = \sqrt{u_{E_z}^2 + u_{E_c}^2 + u_{R_p}^2 + u_{ReEC}^2} \quad (3.26)$$

P7 - Graus de liberdade efetivos (ν_{ef}) Calculado com a equação (3.27).

$$\frac{u_{Q_{mC}}^4}{\nu_{ef}} = \frac{u_{E_z}^4}{\nu_{E_z}} + \frac{u_{E_c}^4}{\nu_{E_c}} + \frac{u_{R_p}^4}{\nu_{R_p}} + \frac{u_{ReEC}^4}{\nu_{ReEC}} \quad (3.27)$$

Considerando que só o número de graus de liberdade da parcela de incerteza associada à repetibilidade nos ensaios é diferente de infinito, temos que o número de graus de liberdade efetivos da medição de vazão mássica com o Coriolis é dado pela equação (3.28).

$$\nu_{ef} = \frac{u_{Q_{mC}}^4 \cdot \nu_{ReEC}}{u_{ReEC}^4} \quad (3.28)$$

P8- Incerteza expandida Dada pela equação (3.29).

$$U_C = t \cdot u_{Q_{mC}} \quad (3.29)$$

A seguir, são apresentados os resultados dos cálculos das incertezas para as medições de vazão mássica com o Coriolis.

Na Tabela 3.17, são apresentados os resultados dos cálculos da parcela de incerteza associada à repetibilidade nos ensaios com o Coriolis.

Tabela 3.17: Incerteza da repetibilidade dos ensaios na medição da vazão mássica com o Coriolis.

| Q_m (kg/min) | \bar{Q}_m (kg/min) | u_{ReEC} (kg/min) |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| 0,0671 | 0,0683 | 0,0010 |
| 0,0687 | | |
| 0,0690 | | |
| 0,0733 | 0,0753 | 0,0017 |
| 0,0759 | | |
| 0,0765 | | |
| 0,0879 | 0,0885 | 0,0006 |
| 0,0884 | | |
| 0,0891 | | |
| 0,0909 | 0,0921 | 0,0012 |
| 0,0920 | | |
| 0,0934 | | |

Fonte: Autor

Com as equações (3.26) e (3.28) são obtidos os valores da Tabela 3.18. Nessa tabela são apresentadas as parcelas de incertezas combinadas, os graus de liberdade efetivos e as incertezas expandidas associadas às medições de vazão mássica com o Coriolis.

Por último, na Tabela 3.19, são apresentadas as vazões mássicas obtidas com o Coriolis e suas respectivas parcelas de incertezas.

Com a finalidade de comparar os resultados da vazão mássica obtida com o método gravimétrico e com o Coriolis, os dados da Tabela 3.15 e da Tabela 3.19 foram agrupados na Figura 3.14. Nessa figura, são apresentados os resultados para as quatro faixas de vazão dos ensaios. Com vermelho é representada a vazão mássica calculada com o método gravimétrico, sendo o ponto o valor da vazão mássica e as linhas superior e inferior os limites para 95% de confiança. Para as medições da vazão mássica realizadas com o Coriolis foi utilizado o ponto azul para representar o valor medido e as linhas verdes os limites para 95% de confiança.

Tabela 3.18: Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida associada à medição de vazão mássica com o Coriolis.

| $u_{Q_{mC}}$ (kg/min) | v_{ef} | $U_{Q_{mC}}$ (kg/min) |
|--------------------------|----------|--------------------------|
| 0,0073 | 5602 | 0,015 |
| 0,0073 | 5602 | 0,015 |
| 0,0073 | 5602 | 0,015 |
| 0,0074 | 739 | 0,015 |
| 0,0074 | 739 | 0,015 |
| 0,0072 | 739 | 0,015 |
| 0,0072 | 46397 | 0,014 |
| 0,0072 | 46397 | 0,014 |
| 0,0072 | 46397 | 0,014 |
| 0,0073 | 2462 | 0,015 |
| 0,0073 | 2462 | 0,015 |
| 0,0073 | 2462 | 0,015 |

Fonte: Autor

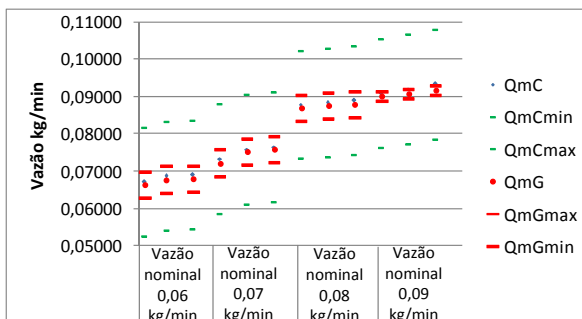
Tabela 3.19: Vazão mássica obtida com o Coriolis.

| Vazão nominal (kg/min) | Q_{mC} (kg/min) | $U_{Q_{mC}}$ (kg/min) |
|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| 0,06 | 0,067 | 0,01 |
| | 0,069 | 0,01 |
| | 0,069 | 0,01 |
| 0,07 | 0,073 | 0,01 |
| | 0,076 | 0,01 |
| | 0,077 | 0,01 |
| 0,08 | 0,088 | 0,01 |
| | 0,088 | 0,01 |
| | 0,089 | 0,01 |
| 0,09 | 0,091 | 0,01 |
| | 0,092 | 0,01 |
| | 0,093 | 0,01 |

Fonte: Autor

Na Figura 3.14, pode-se perceber que as incertezas associadas ao método gravimétrico ficam dentro das incertezas associadas às medições realizadas com o Coriolis. Essa diferença, em grande parte, se deve ao sistema de aquisição empregado para a medição com o transdutor Coriolis.

Figura 3.14: $RM \pm U$ das medições com o Coriolis e o método Gravimétrico.

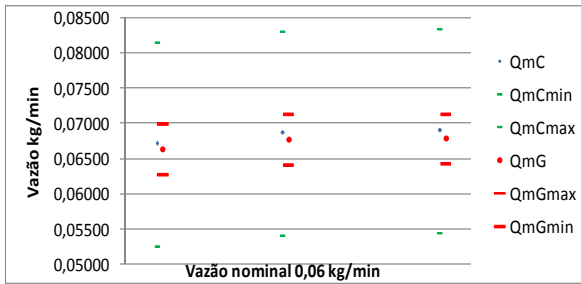


Fonte: Autor

Para poder observar melhor esses resultados, a Figura 3.14 foi subdividida em quatro, uma figura para cada faixa de vazão.

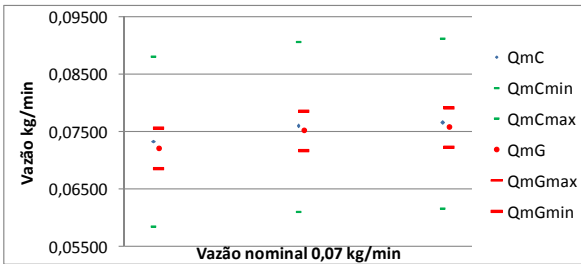
Na Figura 3.15, apresentam-se os resultados dos ensaios para uma vazão nominal de 0,06 kg/min. Nessa figura pode-se perceber melhor que os dados de vazão mássica obtidos com o método gravimétrico se encontram dentro da faixa de incerteza obtida com o Coriolis. Algo semelhante acontece na Figura 3.16 (vazão nominal de 0,07 kg/min), Figura 3.17 (vazão nominal de 0,08 kg/min) e Figura 3.18 (vazão nominal de 0,09 kg/min). Na Figura 3.18, pode-se observar que esses ensaios apresentam uma incerteza expandida muito menor que a obtida nos outros ensaios e isso é causado pela incerteza na repetibilidade mostrada na Tabela 3.12. Uma causa bastante provável para essa diferença é o fato de terem sido realizados só três ensaios por vazão, logo, apesar de ser empregada uma distribuição t de Student para expandir a incerteza padrão, os resultados podem estar mascarados pela existência de poucos ensaios. Entretanto, foi possível identificar as principais fontes de incerteza para corrigi-las no segundo protótipo.

Figura 3.15: RM \pm U para vazão nominal de 0,06 kg/min.

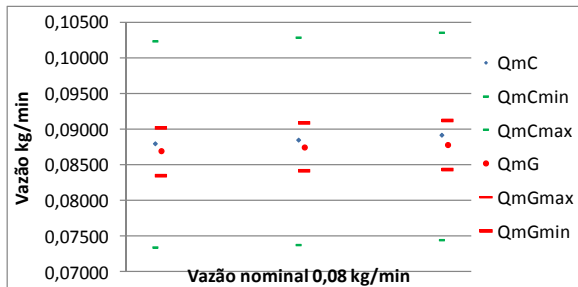


Fonte: Autor

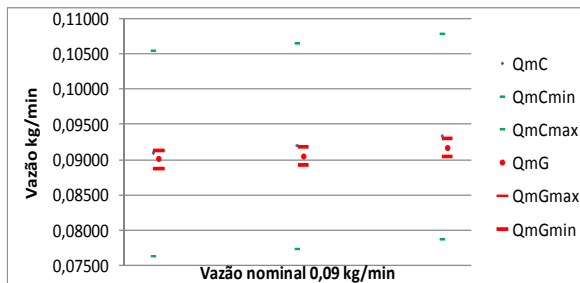
Figura 3.16: RM \pm U para vazão nominal de 0,07 kg/min.



Fonte: Autor

Figura 3.17: RM \pm U para vazão nominal de 0,08 kg/min.

Fonte: Autor

Figura 3.18: RM \pm U para vazão nominal de 0,09 kg/min.

Fonte: Autor

Com base na avaliação de incertezas realizada para o primeiro protótipo de bancada foram levantados os principais pontos que poderiam ser aprimorados para minimizar as incertezas no processo de calibração. Entre esses pontos estão:

- a oscilação no nível do tanque pulmão gera variações na vazão, que acabam comprometendo a repetibilidade dos ensaios, logo é importante conseguir que o nível no tanque pulmão fique o mais estável possível;
- a entrada de água no tanque pulmão gera bolhas e incrementa a oscilação no nível do tanque, o que também prejudica a repetibilidade, logo é importante incorporar um mecanismo que

minimize as perturbações que gera a entrada de água no tanque pulmão;

- a incorporação da válvula diversora permitiria eliminar completamente a participação do operador nos ensaios;
- a adoção de outra placa de aquisição de dados com melhor resolução e referência de tensão para o processo de conversão A/D bem controlada, uma vez que a medição da vazão do transdutor Coriolis com um Arduino empregando a tensão de referência para o processo de conversão A/D como a tensão fornecida pela fonte de alimentação do computador compromete o resultado de vazão mássica tido como padrão.

Com base nesses pontos levantados e na experiência adquirida com o primeiro protótipo, foi projetado e construído um segundo protótipo, cujos resultados são apresentados no Capítulo 4.

4 DESENVOLVIMENTO DO SEGUNDO PROTÓTIPO DE BANCADA

A experiência da montagem e da operação do primeiro protótipo permitiu detectar os pontos fracos do mesmo, com os quais a incerteza na medição é incrementada. O projeto e a seleção dos diferentes componentes para este segundo protótipo foram feitos procurando construir um protótipo no qual os pontos fracos do primeiro protótipo de bancada pudessem ser corrigidos, com a finalidade de minimizar a incerteza. Além disso, foram especificados materiais e componentes compatíveis com os fluidos de trabalho pretendidos e a estrutura foi alterada para que a montagem se tornasse mais robusta.

A estrutura usada neste capítulo é similar à estrutura do capítulo anterior. É detalhado o método de calibração escolhido, juntamente com os equipamentos e procedimentos utilizados para esse novo protótipo de bancada.

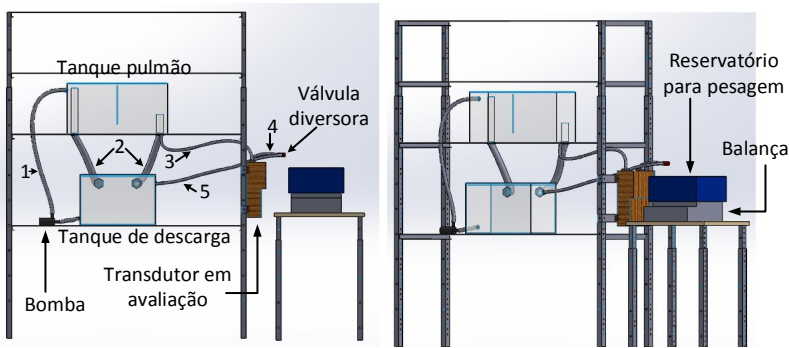
4.1 ESTRUTURA MECÂNICA DO SEGUNDO PROTÓTIPO DE BANCADA

A montagem do segundo protótipo segue a norma ISO 4185 [41]. O transdutor em avaliação continua sendo o medidor Micro Motion do tipo Mass Flow Meter, usado no primeiro protótipo de bancada e detalhado em 3.2.1.

A Figura 4.1 mostra a renderização do esquemático do segundo protótipo de bancada. Nesta figura podem ser observados os componentes que formam parte do segundo protótipo de bancada junto com as conexões entre eles.

A mangueira com o número 1 é a encarregada de permitir a circulação do fluido entre a bomba e o tanque pulmão. As mangueiras com o número 2 são as conexões dos extravasores entre o tanque pulmão e o tanque de descarga. O número 3 representa a mangueira que permite a circulação do fluido entre o tanque pulmão e a entrada do Coriolis. A mangueira 4 conecta a saída do Coriolis com a entrada da válvula diversora e a mangueira 5 conecta uma das saídas da válvula diversora com o tanque de descarga. A outra saída da válvula vai para o reservatório de pesagem, sem necessidade de mecanismos mais sofisticados para controle de nível. Manter o nível constante é importante para garantir que a vazão permaneça constante durante a realização do ensaio, minimizando a repetibilidade.

Figura 4.1: Esquema de montagem do segundo protótipo de bancada.



Fonte: Autor

Os extravasores são os encarregados de manter o nível fixo no tanque pulmão. O diâmetro dos extravasores é muito maior que do resto das mangueiras, e assim conseguem tirar o excesso de fluido e garantir o nível constante. Dessa forma, pode-se ter a bomba ligada o tempo todo.

4.2 DESCRIÇÃO E SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO SEGUNDO PROTÓTIPO

Nesta seção será feita a descrição dos principais componentes usados na montagem do segundo protótipo de bancada.

4.2.1 Balança

A balança usada para este protótipo é a mesma do protótipo anterior. Trata-se de uma balança eletrônica semi-analítica da marca MARTE serie UX6200H, mostrada na Figura 3.3. As especificações técnicas desse modelo são mostradas na Tabela 3.2.

4.2.2 Bomba de recirculação

A bomba usada neste protótipo é uma bomba magnética da marca CHUGGER PUMP, modelo SS INOX, mostrada na Figura 4.2.

O acoplamento ou acionamento magnético consiste em transmissão de torque do motor para o rotor centrífugo de maneira indi-

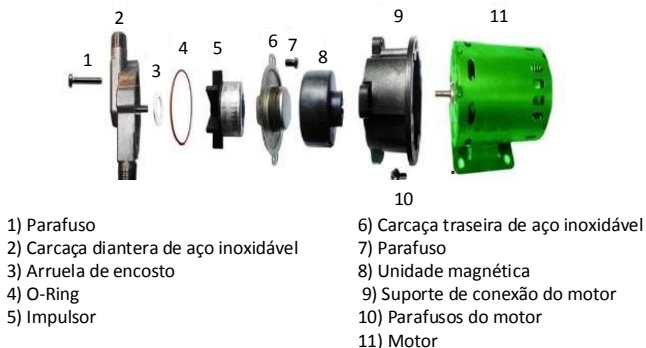
Figura 4.2: Bomba com acoplamento magnético.



Fonte: [52]

reta, através de uma barreira que dispense uma vedação no eixo. A transmissão indireta é feita com dois “copos” (6 e 8 da Figura 4.3), um dentro do outro, sendo que o externo (8 da Figura 4.3) está conectado ao motor, e o interno (6 da Figura 4.3) é componente de isolamento da câmara de bombeamento, que contém o impulsor rotativo (5 da Figura 4.3). Tanto o impulsor quanto o copo externo apresentam ímãs axiais distribuídos ao redor do eixo de rotação, formando um conjunto unido magneticamente. Dessa forma, ao rodar o copo externo, automaticamente o impulsor rotaciona junto ao redor de seu eixo, produzindo a transmissão do torque.

Figura 4.3: Bomba com acoplamento magnético.



Fonte: [53]

Uma das características principais nesse tipo de bomba é o isolamento mecânico entre o corpo e o motor, que elimina por completo a necessidade de qualquer tipo de dispositivo de vedação dinâmica. Isto reduz o número de possíveis caminhos de vazamento e permite o trabalho com fluidos inflamáveis.

Como os ensaios serão com água e tendo em mente realizar ensaios futuros com óleos e gasolina, o corpo da bomba (impulsor) usada no segundo protótipo de bancada é de aço inox.

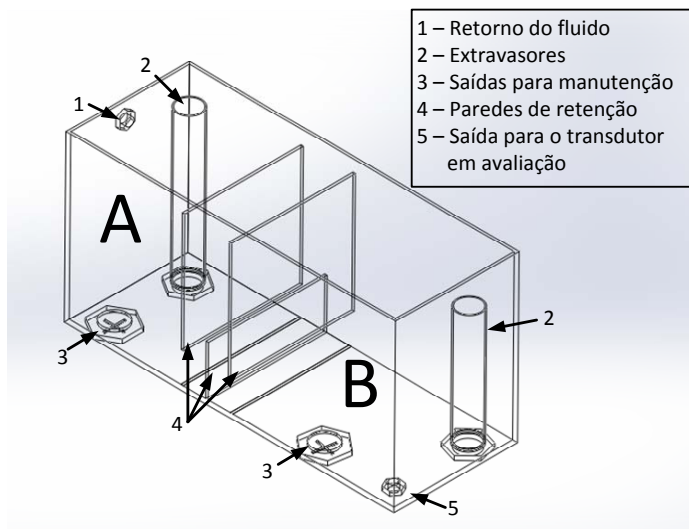
4.2.3 Tanques

Neste protótipo os tanques de PET do primeiro protótipo foram trocados por tanques em aço inox. O desenho dos tanques foi feito pensando em ter um protótipo onde seja possível trabalhar com fluidos como água, gasolina e óleos. Além disso, procurou-se minimizar a variação de nível do tanque provocada pela circulação do fluido de trabalho durante o ensaio, com adição de um extravasador e de barreiras mecânicas para minimizar as oscilações provocadas pelo retorno de fluido.

Devido às restrições de espaço físico no laboratório onde o segundo protótipo de bancada é montado, decidiu-se que a capacidade dos tanques seja similar à capacidade dos tanques do primeiro protótipo. Dessa forma o tanque pulmão da segunda bancada tem 400 mm de comprimento, 150 mm de largura e 200 mm de altura, o que lhe confere um volume aproximado de 12 l.

Na Figura 4.4, mostra-se o tanque pulmão e as diferentes partes que o compõem. O tanque pulmão foi dividido em duas seções separadas por três paredes. Do lado esquerdo, identificado na Figura com a letra “A”, encontra-se a seção do tanque onde o fluido ingressa de forma constante. A seção do lado direito, identificada na Figura com a letra “B”, é a seção do tanque por onde o fluido sai do orifício 5 para entrar no Coriolis. O orifício lateral esquerdo, identificado na Figura 4.4 com o número 1, é o orifício por onde ingressa o fluido. Os cilindros identificados com o números 2 são extravasores. O extravasador da seção “B” é o encarregado de manter o nível constante na seção de saída do fluido do tanque pulmão e o extravasador da seção “A” é de emergência para evitar vazamentos no caso em que o extravasador da direita não consiga manter o nível constante.

Figura 4.4: Tanque pulmão do segundo protótipo de bancada.



Fonte: Autor

Os pontos 3 são as saídas para manutenção do tanque. Essas duas saídas permitem esvaziar o tanque quando isso seja preciso. Ambas as saídas possuem tampas com rosca.

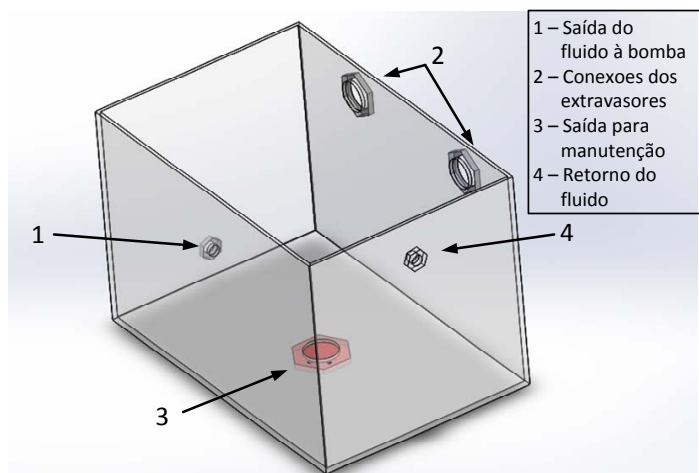
As três paredes que separam as seções “A” e “B”, identificadas na Figura 4.4 com o número 4, mantêm o fluido da seção “B” sem ondulações. O fluido que ingressa no tanque pulmão é impulsionado pela bomba e impacta na primeira parede à esquerda, gerando assim uma perturbação no fluido existente na seção “A” do tanque. A primeira parede à esquerda absorve parte deste impacto fazendo com que o fluido entre na seção “A” escorrendo pela parede. As outras duas paredes diminuem as oscilações ainda existentes fazendo com que o fluido chegue na seção “B” sem oscilações, para se conseguir ter um nível constante na seção “B”.

O reservatório ou tanque de descarga também foi construído em aço inox e tem a mesma capacidade do tanque pulmão. Tem 300 mm de comprimento, 200 mm de largura e 200 mm de altura, com volume aproximado de 12 l. A Figura 4.5 mostra o projeto do tanque de descarga.

O orifício na parede esquerda, enumerado com 1 na Figura

4.5, é o encarregado de alimentar a bomba. Os orifícios na parede traseira, marcados com o número 2, são as conexões dos extravasores do tanque pulmão, um para cada extravasador. Por último, o orifício 3 da parede direita é a conexão que liga a saída do medidor de vazão sob avaliação com o tanque reservatório.

Figura 4.5: Tanque de descarga do segundo protótipo de bancada.



Fonte: Autor

Ambos os tanques possuem tampas, visando futuramente trabalhar com fluidos voláteis, como a gasolina.

4.2.4 Válvula diversora

Nesta bancada, foi usada uma válvula solenoide 3/2 vias para o controle da direção do fluido, entre o reservatório de pesagem ou o tanque descarga. A válvula é da marca NORGREN, modelo 2401147.

A escolha da válvula foi feita pensando na compatibilidade com água, óleos e gasolina, por isso o corpo da válvula é de aço inox e as vedações de FPM (das siglas em inglês *fluoroelastomer polymer*).

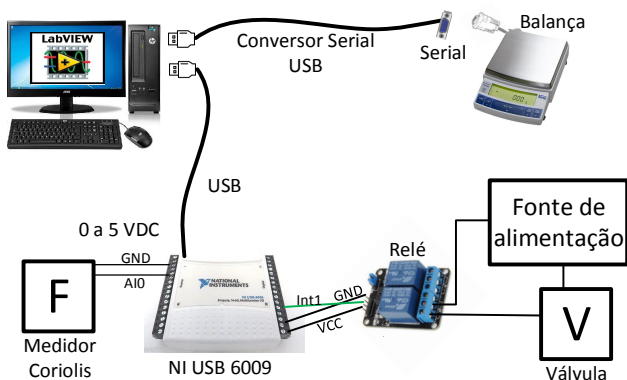
4.2.5 Sistema de aquisição de dados

Para a segunda bancada, o sistema de aquisição de dados sofreu algumas modificações. A arquitetura de comunicação mostrada na Figura 3.6 foi mantida, o único que foi trocado é a placa de aquisição de dados. Nesta segunda bancada o Arduino MEGA foi substituído por uma placa de aquisição de dados da National Instruments NI USB 6009. A maior diferença entre o Arduino MEGA e a NI USB 6009 é a resolução, já que a NI USB 6009 possui 14 bits de resolução e a Arduino MEGA 10 bits. Além disso, a placa possui uma referência de tensão estabilizada de 5 V, coisa que o Arduino não possui.

Visto que nesta bancada está se usando a válvula diversora, foi preciso adicionar um relé para ativar ou desativar a bobina da válvula. Com isso a arquitetura do sistema de aquisição de dados da segunda bancada ficou como se mostra na Figura 4.6.

A lógica de trabalho não foi modificada, continua igual à descrita na seção 3.2.5, porém com substituição do alerta do usuário para alterar a mangueira de saída do medidor de vazão pelo acionamento direto da válvula diversora.

Figura 4.6: Comunicação entre o Labview o medidor Coriolis e a balança.

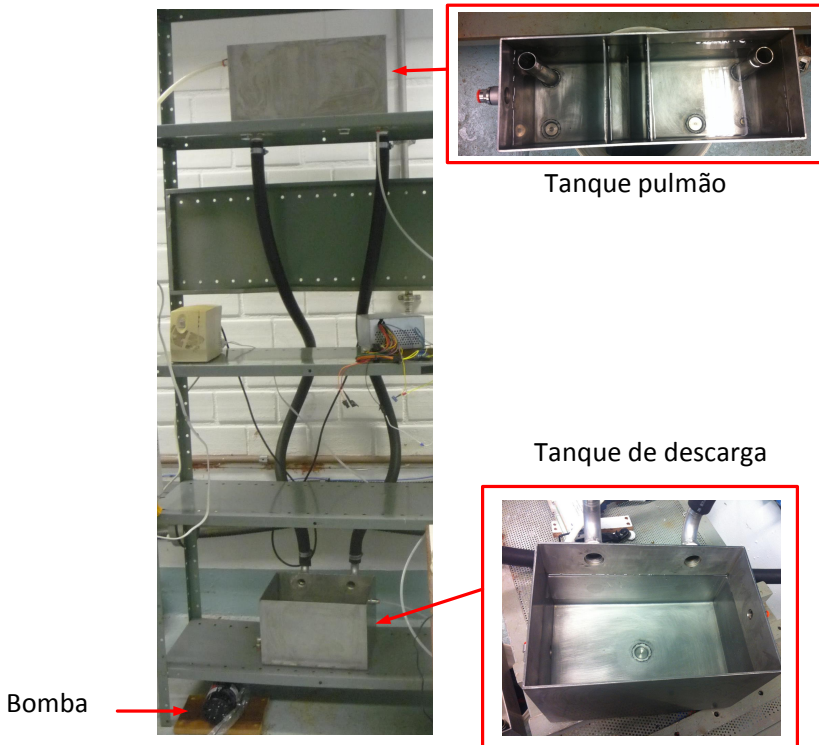


Fonte: Autor

4.3 RESULTADOS

Na Figura 4.7, mostram-se os tanques e a bomba do segundo protótipo de bancada. Na Figura 4.8, mostram-se a válvula diverSORA, o recipiente de pesagem e a balança. A estrutura completa do segundo protótipo de bancada é mostrada na Figura 4.9.

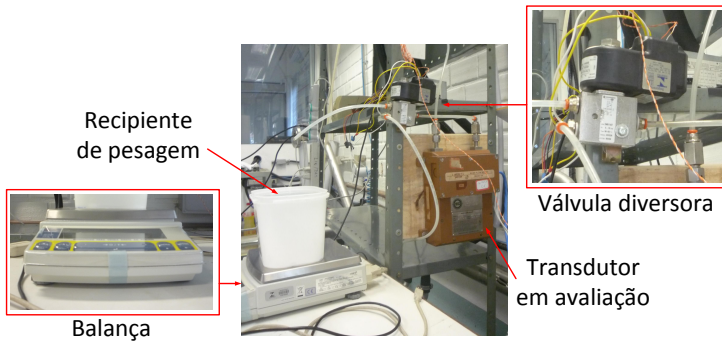
Figura 4.7: Tanques e bomba do segundo protótipo de bancada.



Fonte: Autor

Como pode-se observar, em geral foi seguido o esquema de montagem da Figura 4.1, com a única diferença que a bomba não foi montada na mesma prateleira que o tanque de descarga, isso porque viu-se que a vibração gerada pela bomba poderia influenciar nas medições. Tentando minimizar a influencia da vibração da bomba foi decidido que a melhor opção era instalar a bomba fora da estrutura onde o resto dos componentes do segundo protótipo

Figura 4.8: Balança e válvula diversora do segundo protótipo de bancada.



Fonte: Autor

de bancada foi montado.

Nesta bancada o nível do tanque pulmão é fixo, visto que o extravasor encarregado de manter o nível não é ajustável. Para conseguir variar a vazão do ensaio é preciso variar a altura entre o tanque pulmão e o transdutor em avaliação. A ideia inicial era incluir uma válvula automática para permitir a variação da vazão, porém optou-se por construir a bancada sem essa válvula inicialmente porque não se dispunha de válvula automática compatível com os fluidos de interesse. Os ensaios nessa bancada foram realizados em torno de uma vazão nominal de $0,079 \text{ kg/min}$, para uma altura entre o tanque pulmão e o transdutor em avaliação de 65 cm . Diferentemente dos ensaios realizados no primeiro protótipo, a quantidade de massa de água utilizada nos ensaios deste segundo protótipo é 1000 g . Aumentou-se a quantidade de massa de água procurando estender a quantidade de dados em regime permanente.

Para a análise dos resultados obtidos com o segundo protótipo de bancada foi usada a mesma metodologia do primeiro protótipo, ou seja, foram considerados apenas os dados da região onde ambos métodos de medição encontram-se em condição de regime permanente. Também foram consideradas as compensações da massa específica e a evaporação.

Os resultados dos ensaios com esta bancada são apresentados na Tabela 4.1. Estes resultados foram obtidos tendo em consideração o fator de compensação para a evaporação e para o efeito do empuxo do ar para cima. Analisando os dados dos erros obtidos nos

Figura 4.9: Estrutura completa do segundo protótipo de bancada.



Fonte: Autor

ensaios, se obteve que o erro médio equivale a 0,03% (0,20 g) com um desvio padrão de 0,03% (0,20 g).

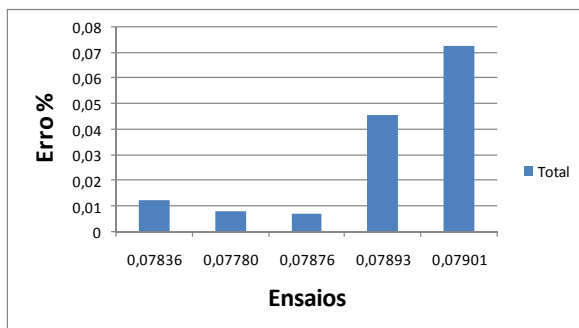
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios com o segundo protótipo de bancada.

| Ensaio | Q_m Coriolis (kg/min) | Q_m Método gravimétrico (kg/min) | Erro (%) |
|--------|-------------------------|------------------------------------|----------|
| 1 | 0,07836 | 0,07837 | 0,012 |
| 2 | 0,07780 | 0,07780 | 0,008 |
| 3 | 0,07876 | 0,07876 | 0,007 |
| 4 | 0,07893 | 0,07889 | 0,046 |
| 5 | 0,07901 | 0,07907 | 0,073 |

Fonte: Autor

Na Figura 4.10, são apresentados os erros em porcentagem dos ensaios realizados com o segundo protótipo de bancada nessa figura, pode-se perceber que os erros encontram-se abaixo de 0,075%.

Figura 4.10: Curva de erros.



Fonte: Autor

Na sequência, seguindo o formato usado no capítulo 3, serão apresentados os resultados da avaliação das principais fontes de incerteza de medição presentes tanto na bancada quanto no transdutor.

4.3.1 Avaliação das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico

Para a avaliação da incerteza da medição de vazão mássica obtida com o método gravimétrico, da mesma maneira que no capítulo 3, a análise vai ser realizada por separado. Na seção 4.3.1.1, são apresentados os resultados da avaliação das incertezas na medição da massa e, na seção 4.3.1.2, os resultados da avaliação das incertezas na medição do tempo. Por último, a incerteza na medição da vazão mássica é obtida aplicando a incerteza padrão da divisão, a qual é mostrada na equação (3.16). Dessa forma, os detalhes da análise realizadas no capítulo 3 serão suprimidos.

4.3.1.1 Avaliação das incertezas nas medições de massa feitas com a balança

Seguindo com a estrutura de análise do capítulo 3, a seguir, vai ser feita uma rápida revisão dos oito passos usados para avaliar a fontes de incertezas na medição da massa.

P1 - Análise do processo de medição A metodologia usada para a medição de massa no segundo protótipo de bancada é uma cópia melhorada do primeiro protótipo. Em geral, toda a análise feita no ponto P1 da seção 3.3.1.1 vale para esta seção. A única diferença é que no segundo protótipo de bancada usa-se uma válvula diversora, o que garante que a interferência do operador no resultado do ensaio seja eliminada.

P2 - Fontes de incertezas A balança usada, tanto no primeiro protótipo de bancada quanto no segundo, é a mesma, e os valores da repetibilidade, resolução e linearidade da balança já foram apresentados no ponto P2 da seção 3.3.1.1.

O mesmo acontece com o coeficiente de temperatura na sensibilidade. Já que os ensaios com o segundo protótipo foram realizados no mesmo laboratório usado para os ensaios do primeiro protótipo o dT se mantém igual a $0,000015\Delta m$.

P3 - Estimativa da correção Mantêm-se os mesmos já descritos no ponto P3 da seção 3.3.1.1.

Os valores da massa específica do ar, do fluido (água) e dos pesos usados para calibrar a balança para o cálculo do fator de compensação de massa para o efeito do empuxo do ar são os mesmos já usados no capítulo anterior. Os resultados desses

cálculos são apresentados na Tabela 4.2. Nas colunas 3 e 4 mostram-se os valores das massas final e inicial mais o fator de compensação para o efeito do empuxo do ar. Na última coluna são apresentados os valores da variação de massa.

Tabela 4.2: Cálculo do fator de compensação para o efeito do empuxo do ar para cima.

| m_f (g) | m_i (g) | $m_f +$ empuxo (g) | $m_i +$ empuxo (g) | Δm (g) |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 1001,29 | 328,05 | 1002,35 | 328,40 | 673,95 |
| 1001,98 | 325,56 | 1003,04 | 325,90 | 677,13 |
| 1001,94 | 164,30 | 1003,00 | 164,47 | 838,52 |
| 1000,91 | 298,73 | 1001,97 | 299,05 | 702,92 |
| 1001,51 | 298,61 | 1002,57 | 298,93 | 703,64 |

Fonte: Autor

P4 - Correção combinada Da mesma maneira que no ponto P4 da seção 3.3.1.1, neste caso, a correção combinada é nula.

P5 - Incertezas padrão As equações para determinar a parcela de incerteza referente a resolução, linearidade e repetibilidade da balança são apresentadas nas equação (3.2), (3.3) e (3.4), respectivamente. Os valores dessas incertezas são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Incertezas da repetibilidade, resolução e linearidade da balança.

| Parâmetro | Valor (g) | u (g) | v (g) |
|-----------|-----------|---------|----------|
| R_B | 0,01 | 0,0058 | ∞ |
| Re_B | 0,01 | 0,0050 | ∞ |
| lin | 0,02 | 0,0115 | ∞ |

Fonte: Autor

Para o cálculo da parcela de incerteza referente ao coeficiente de temperatura na sensibilidade da balança, é usada a equação mostrada em (3.5). Os resultados do cálculo dessa parcela são mostrados na Tabela 4.4

P6 - Incerteza padrão combinada É calculada com a equação (3.6).

Tabela 4.4: Incerteza do coeficiente de temperatura dT .

| dT (g) | u_{dT} (g) | v_{dT} |
|----------|--------------|----------|
| 0,0101 | 0,0058 | ∞ |
| 0,0102 | 0,0059 | ∞ |
| 0,0126 | 0,0073 | ∞ |
| 0,0105 | 0,0061 | ∞ |
| 0,0106 | 0,0061 | ∞ |

Fonte: Autor

P7 - Graus de liberdade efetivos (v_{ef}) Calculado com a equação (3.8).

P8 - Incerteza expandida Calculada com base na incerteza combinada a partir da equação (3.9).

Os resultados da avaliação da incerteza instrumental padrão combinada, os graus de liberdade e a incerteza instrumental expandida na medição da massa são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida da variação na massa.

| u_{I_m} (g) | v_{ef} | U_{I_m} (g) |
|------------------|----------|------------------|
| 0,0204 | ∞ | 0,041 |
| 0,0204 | ∞ | 0,041 |
| 0,0209 | ∞ | 0,042 |
| 0,0205 | ∞ | 0,041 |
| 0,0205 | ∞ | 0,041 |

Fonte: Autor

4.3.1.2 Avaliação das incertezas de medição do tempo

P1 - Análise do processo de medição A metodologia usada para a medição do tempo no segundo protótipo de bancada é uma cópia do primeiro protótipo. Em geral, toda a análise feita no ponto P1 da seção 3.3.1.2 vale para esta seção.

- P2 - Fontes de incertezas** Os valores da resolução e da incerteza na sincronização para a aquisição dos dados, detalhados no ponto P2 da seção 3.3.1.2, são mantidos nesta seção.
- P3 - Estimativa da correção** Mantêm-se as mesmas considerações já descritas no ponto P3 da seção 3.3.1.2, sendo a correção nula.
- P4 - Correção combinada** Neste caso, a correção combinada é nula.
- P5 - Incertezas padrão** A equação para determinar a parcela de incerteza referente à medição de tempo na região de regime permanente é mostrada em (3.10). A Tabela 4.6 mostra os resultados da avaliação das incertezas na medição do tempo na região de regime (u_t).

Tabela 4.6: Incerteza para a medições do tempo na região de regime.

| Δt (min) | Δt_T (min) | u_t (s) | u_t (min) |
|---------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| 8,6007 | 12,8512 | 1,3385 | 0,0223 |
| 8,6941 | 12,9403 | 1,3437 | 0,0224 |
| 10,6471 | 12,7740 | 1,6670 | 0,0278 |
| 8,9007 | 12,7316 | 1,3982 | 0,0233 |
| 8,8899 | 12,7255 | 1,3972 | 0,0233 |

Fonte: Autor

Para determinar a parcela da incerteza referente à resolução, é usada a equação (3.11). Estes resultados são apresentados na Tabela 4.7.

- P6 - Incerteza padrão combinada** É calculada com a equação (3.12).
- P7 - Graus de liberdade efetivos (vef)** Calculado com a equação (3.14).
- P8 - Incerteza expandida** Calculada com base na incerteza combinada a partir da equação (3.15)

Como os dados das Tabelas 4.6 e 4.7, pode-se proceder ao cálculo da incerteza padrão combinada para a variação no tempo. Estes resultados, juntamente com os graus de liberdade efetivos e a incerteza expandida, são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.7: Incerteza da resolução do contador de tempo.

| R_C (s) | u_{R_C} (s) | u_{R_C} (min) |
|--------------|------------------|--------------------|
| 0,001 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,001 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,001 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,001 | 0,00058 | 9,62E-6 |
| 0,001 | 0,00058 | 9,62E-6 |

Fonte: Autor

Tabela 4.8: Incerteza combinada e graus de liberdade efetivos da variação no tempo.

| $u_{\Delta t}$ (min) | v_{ef} | $U_{\Delta t}$ (min) |
|-------------------------|----------|-------------------------|
| 0,0223 | ∞ | 0,045 |
| 0,0224 | ∞ | 0,045 |
| 0,0278 | ∞ | 0,056 |
| 0,0233 | ∞ | 0,047 |
| 0,0233 | ∞ | 0,047 |

Fonte: Autor

4.3.1.3 Cálculo das incertezas da vazão mássica obtida com o método gravimétrico

Tendo concluída a análise das incertezas referentes à medição de massa e tempo, procede-se com a avaliação da incerteza instrumental da vazão mássica. Para isso, é preciso aplicar a equação da incerteza padrão da divisão, mostrada em (3.16). Neste cálculo são usados os dados das Tabelas 4.5 e 4.8. Para o cálculo dos graus de liberdade efetivos, é usada a equação (3.17).

Os resultados da incerteza instrumental da vazão mássica, dos graus de liberdade e da incerteza instrumental expandida da vazão mássica são mostrados na Tabela 4.9.

A repetibilidade da vazão mássica e a repetibilidade da vazão mássica instantânea nos ensaios são calculadas com as equações (3.16) e (3.18), respectivamente. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11, respectivamente.

Tabela 4.9: Incertezas padrão e expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

| $u_{I_{Q_m}}$ (g/min) | v_{ef} | $U_{I_{Q_m}}$ (g/min) | $U_{I_{Q_m}}$ (kg/min) |
|--------------------------|----------|--------------------------|---------------------------|
| 0,068 | 169,59 | 0,14 | 0,00014 |
| 0,067 | 163,95 | 0,13 | 0,00013 |
| 0,076 | 111,00 | 0,15 | 0,00015 |
| 0,070 | 160,56 | 0,14 | 0,00014 |
| 0,070 | 161,66 | 0,14 | 0,00014 |

Fonte: Autor

Tabela 4.10: Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica.

| m (kg) | t (min) | Q_{m_G} (kg/min) | \bar{Q}_{m_G} (kg/min) | $u_{Re_{Q_{m_G}}}$ (kg/min) |
|-------------|--------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 0,6732 | 8,6007 | 0,0783 | 0,0785 | 0,00051 |
| 0,6764 | 8,6941 | 0,0778 | | |
| 0,8376 | 10,6471 | 0,0787 | | |
| 0,7022 | 8,9007 | 0,0789 | | |
| 0,7029 | 8,8899 | 0,0791 | | |

Fonte: Autor

Tabela 4.11: Incerteza da repetibilidade na medição de vazão mássica instantânea.

| $Re_{Q_{miG}}$ (kg/min) | $u_{Re_{Q_{miG}}}$ (kg/min) | v_{ef} |
|----------------------------|--------------------------------|----------|
| 0,00017 | 2,68E-6 | 6046 |
| 0,00014 | 2,20E-6 | 6094 |
| 0,00018 | 2,59E-6 | 6005 |
| 0,00018 | 2,72E-6 | 5981 |
| 0,00021 | 3,20E-6 | 5971 |

Fonte: Autor

A Tabela 4.12 apresenta os valores da incerteza padrão e combinada da vazão mássica obtidas com o método gravimétrico e calculadas com a equação (3.19).

Tabela 4.12: Incertezas padrão e expandida da vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

| $u_{Q_{m_G}}$ (g/min) | $U_{Q_{m_G}}$ (g/min) | $U_{Q_{m_G}}$ (kg/min) |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 5,12E-7 | 1,47E-6 | 0,0015 |
| 5,12E-7 | 1,47E-6 | 0,0015 |
| 5,14E-7 | 1,47E-6 | 0,0015 |
| 5,13E-7 | 1,47E-6 | 0,0015 |
| 5,13E-7 | 1,47E-6 | 0,0015 |

Fonte: Autor

Na Tabela 4.13, são apresentadas as vazões mássicas obtidas com o método gravimétrico conjuntamente a suas respectivas incertezas.

Tabela 4.13: Vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

| Vazão nominal (kg/min) | Q_{m_G} (kg/min) | $U_{Q_{m_G}}$ (kg/min) |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 0,079 | 0,078 | 0,001 |
| | 0,078 | 0,001 |
| | 0,079 | 0,001 |
| | 0,079 | 0,001 |
| | 0,079 | 0,001 |
| | 0,079 | 0,001 |

Fonte: Autor

4.3.2 Avaliação das incertezas na medição da vazão mássica com o Coriolis

P1 - Análise do processo de medição O transdutor em avaliação usado é o mesmo do primeiro protótipo. A análise usada no ponto P1 da seção 3.3.2 é válida para esta seção.

P2 - Fontes de incertezas As incertezas referentes a estabilidade do zero e erro combinado do Coriolis, detalhadas no ponto P2 da seção 3.3.2, são válidas para esta seção.

Em relação à resolução da placa de aquisição de dados, nesse protótipo foi substituído o Arduino MEGA pela placa de aquisição de dados NI USB 6009 da National Instruments. A NI USB 6009 possui uma resolução de 14 bits [54], logo a relação em tensão é dada por:

$$R_{pNI} = \frac{5 - (-5)}{2^{14} - 1} = 0,61 \text{ mV}$$

De acordo com a folha de especificações [54], para operações com intervalos de $\pm 5 \text{ V}$ a incerteza é de 4,28 mV. Dessa forma, tem-se que a parcela referente à placa de aquisição é:

$$R_p = \sqrt{(0,61^2 + 4,28^2)} = 4,323 \text{ mV}$$

Tendo em consideração que para 0,25 kg/min de vazão tem-se uma tensão de saída de 5 V, então 4,323 mV representam uma vazão de 0,000216 kg/min.

P3 - Estimativa da correção Não foram identificadas parcelas sistemáticas possíveis de corrigir.

P4 - Correção combinada Neste caso, a correção combinada é nula.

P5 - Incertezas padrão Para os cálculos das incertezas referentes à estabilidade em zero e o erro combinado do Coriolis, são usadas as equações (3.22) e (3.23), respectivamente. O cálculo da parcela referente ao sistema de aquisição é feito com a equação (3.24). Os resultados dessas três parcelas de incertezas são mostrados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Incerteza padrão e graus de liberdade na medição de vazão com o Coriolis.

| Parâmetro | Valor (kg/min) | u (kg/min) | ν |
|-----------|----------------|--------------|----------|
| E_z | 0,00010 | 0,00006 | ∞ |
| E_c | 0,00050 | 0,00025 | ∞ |
| R_p | 0,0043 | 0,00012 | ∞ |

Fonte: Autor

A parcela associada à repetibilidade nas medições realizadas com o Coriolis é calculada com a equação (3.25) e mostrada na Tabela 4.15.

P6 - Incerteza padrão combinada É calculada com a equação (3.26).

Tabela 4.15: Incerteza da repetibilidade dos ensaios na medição da vazão mássica com o Coriolis.

| Q_m (kg/min) | \bar{Q}_m (kg/min) | u_{ReEC} (kg/min) |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| 0,0784 | 0,0787 | 0,00061 |
| 0,0778 | | |
| 0,0793 | | |
| 0,0789 | | |
| 0,0790 | | |

Fonte: Autor

P7 - Graus de liberdade efetivos (v_{ef}) Calculado com a equação (3.28).

P8 - Incerteza expandida Calculada com base na incerteza combinada a partir da equação (3.29).

A Tabela 4.16 mostra os resultados obtidos para a incerteza padrão combinada, para os graus de liberdade efetivos e a incerteza expandida para as medições realizadas com o Coriolis.

Tabela 4.16: Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida associada à medição de vazão mássica com o Coriolis.

| $u_{Q_{mC}}$ (kg/min) | v_{ef} | $U_{Q_{mC}}$ (kg/min) |
|--------------------------|----------|--------------------------|
| 0,00067 | 5,9717 | 0,0017 |
| 0,00067 | 5,9717 | 0,0017 |
| 0,00067 | 5,9717 | 0,0017 |
| 0,00067 | 5,9717 | 0,0017 |
| 0,00067 | 5,9717 | 0,0017 |

Fonte: Autor

Por último, na Tabela 4.17, são mostradas as medições de vazão mássica obtidas com o Coriolis conjuntamente com suas respectivas incertezas expandidas.

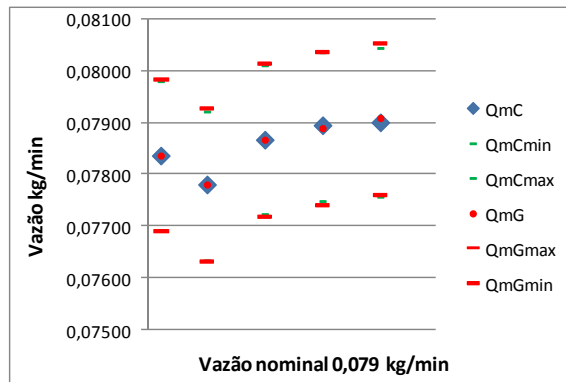
Seguindo a estrutura do capítulo 3, a seguir é apresentada, na Figura 4.11, a comparação dos resultados das medições realizadas com o método gravimétrico e com o transdutor conjuntamente com

Tabela 4.17: Vazão mássica obtida com o Coriolis.

| Vazão nominal (kg/min) | Q_{mC} (kg/min) | $U_{Q_{mC}}$ (kg/min) |
|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| 0,079 | 0,078 | 0,002 |
| | 0,078 | 0,002 |
| | 0,079 | 0,002 |
| | 0,079 | 0,002 |
| | 0,079 | 0,002 |

Fonte: Autor

suas respectivas incertezas. Como pode-se observar nessa figura, a média do erro entre as medições de ambos os métodos é 0,03%, equivalente a 0,021 g/min. Com respeito às incertezas expandidas, a incerteza das medições com o método gravimétrico é 67% da incerteza das medições realizadas com o transdutor Coriolis.

Figura 4.11: (RM \pm U) kg/min.

Fonte: Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi realizada a construção de uma bancada que permite calibrar diferentes tipos de medidores de vazão de líquidos no intervalo de até 6 kg/h. Além de poder ser empregada para calibrar os medidores de vazão com os próprios fluidos de trabalho, a bancada poderá ser empregada para avaliar a influência da adoção de diferentes fluidos nos diversos princípios de medição de vazão.

Para tanto, foram implementados dois sistemas de calibração: um primeiro protótipo de baixo custo, usado para fazer testes iniciais e identificar os pontos críticos a serem levados em consideração na construção do segundo protótipo, e um segundo protótipo, que agrega as melhorias do primeiro protótipo e é totalmente automático.

Para a identificação dos pontos críticos, foi realizada uma análise das fontes de incerteza que afetam as medições do primeiro protótipo. Nesse protótipo, os ensaios foram realizados em torno de quatro diferentes valores de vazão, compreendidos no intervalo de (0,06 a 0,095) kg/min. Deste primeiro trabalho, gerou-se um artigo científico para a seguinte conferência: 12th IEEE/IAS *International Conference on Industry Applications* - INDUSCON 2016.

No segundo protótipo, procurou-se corrigir os pontos fracos do primeiro com a finalidade de minimizar as incertezas no processo de calibração e planejando obter uma bancada que pudesse trabalhar com fluidos diversos, tais como: água, óleos minerais e gasolina. Para isso, foram trocados os tanques de PET do primeiro protótipo por tanques em aço inox e a bomba foi substituída por uma bomba selada com acoplamento magnético e corpo de aço inox. Além disso, foi instalada uma válvula diversora para eliminar a participação do operador que introduz erros causados pela falta de padronização dos movimentos e tempos nas mudanças de direção do fluido entre o tanque de descarga e o recipiente de pesagem. Todos os componentes foram especificados para terem compatibilidade química com as substâncias de interesse e para permitir a operação com fluidos inflamáveis. Para manter o nível fixo no tanque pulmão, foi instalado um extravasor que garante que o excesso do líquido dentro do tanque seja desviado para o tanque de descarga. Desta maneira, fica dentro do tanque somente a quantidade de líquido necessária para manter um nível fixo. Como o extravasor possui uma altura fixa, para conseguir variar a vazão nos ensaios com o segundo protótipo foi preciso variar a altura entre o tanque pulmão e o transdutor em avaliação. Os ensaios do se-

gundo protótipo foram realizados em torno de uma vazão nominal de 0,079 kg/min, para uma altura de 65 cm entre o tanque pulmão e o transdutor em avaliação.

Para realizar a comparação entre os resultados obtidos com o primeiro protótipo e com o segundo, foram levados em consideração os resultados dos ensaios para a vazão nominal de 0,07 kg/min do primeiro protótipo. Na Tabela 3.3, pode-se observar que o erro médio no intervalo de vazão de 0,07 kg/min no primeiro protótipo é de 1,26%. Já na Tabela 4.1, mostra-se que o erro médio obtido com o segundo protótipo é de 0,03%. Isto representa uma diminuição de 42 vezes no valor do erro para o segundo protótipo de bancada em relação ao primeiro protótipo de bancada.

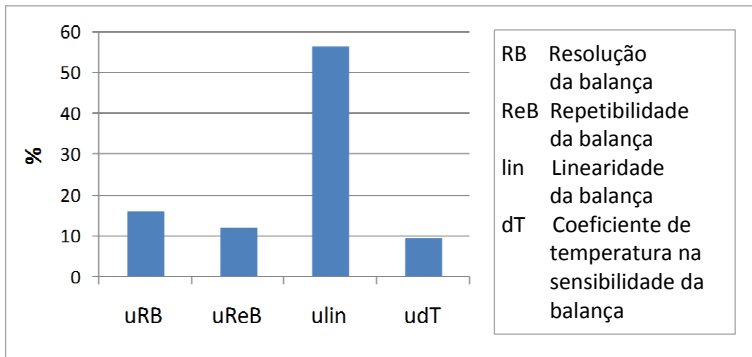
Comparando os resultados da vazão mássica obtida com o método gravimétrico no primeiro protótipo (Tabela 3.3) e no segundo protótipo (Tabela 4.1), temos que o desvio padrão nas medições de vazão mássica no primeiro protótipo é de 0,0016 kg/min e no segundo protótipo é de 0,0005 kg/min. Percebe-se assim que as medições obtidas com o primeiro protótipo são mais oscilatórias em comparação com as obtidas com o segundo protótipo.

Em relação às incertezas expandidas na medição de vazão mássica com o método gravimétrico, a média das incertezas expandidas obtida no primeiro protótipo de bancada (Tabela 3.15) é de $\pm 0,004$ kg/min e no segundo protótipo (Tabela 4.13) é de $\pm 0,001$ kg/min.

Em relação aos resultados obtidos com o segundo protótipo de bancada, na sequência apresenta-se uma análise da influência das incertezas padrão nas medições. Para isso, as Figuras 5.1, 5.2, 5.4 e 5.5 mostram a participação porcentual de cada fonte de incerteza nas incertezas combinadas da massa, tempo, medição de vazão com o método gravimétrico e medição de vazão mássica com o Coriolis.

Na Figura 5.1, mostra-se a participação porcentual de cada uma das fontes de incerteza instrumental que influenciam na medição da massa. Nesta figura pode-se perceber que a incerteza na linearidade da balança representa 56% da incerteza instrumental na medição de massa e é dominante em relação às demais fontes de incerteza.

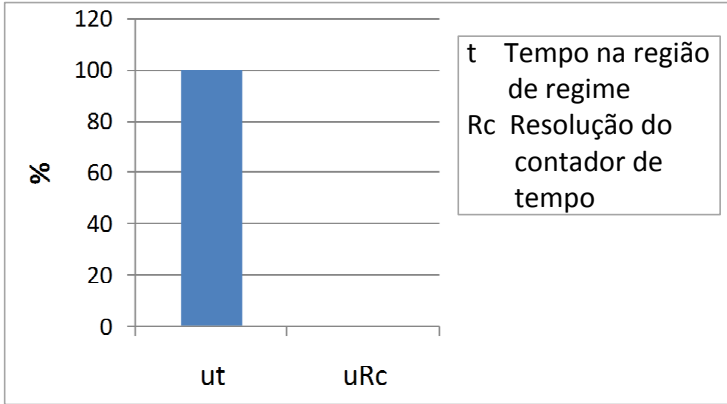
Figura 5.1: Participação percentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada da massa.



Fonte: Autor

Analisando as incertezas relacionadas com a medição de tempo, pode-se observar na Figura 5.2 que a incerteza referente à medição de tempo na região estável representa 100% da incerteza combinada, a qual é devida à consideração que foi utilizada na análise desta incerteza. No ponto P5 da seção 3.3.1.2, foi considerado que, na pior das hipóteses, a sincronização da leitura dos dados teria um erro de ± 1 s no início e ± 1 s no fim do ensaio, o que representa um erro máximo de ± 2 s no tempo total do ensaio. Esse comportamento poderia ser melhorado garantindo-se uma melhor sincronização entre as leituras de tempo e de massa, porém com a balança atual isso não é possível, pois seu firmware não é aberto e não há informações sobre o tempo existente entre a leitura dos dados e o envio dos mesmos pela interface de comunicação serial. A alternativa mais viável para minimizar esse tempo é substituir a balança por uma célula de carga que permita o tratamento direto dos dados, sem depender de um firmware de terceiros. Adicionalmente, deve-se notar que a suposição de variação de ± 1 s em cada extremo é bastante conservadora, pois por mais que exista um atraso considerável entre a medição e a disponibilização do valor correspondente pela balança, há uma tendência natural de os tempos no início e no fim do ensaio se compensarem, visto que espera-se que esse atraso seja constante.

Figura 5.2: Participação percentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada do tempo.



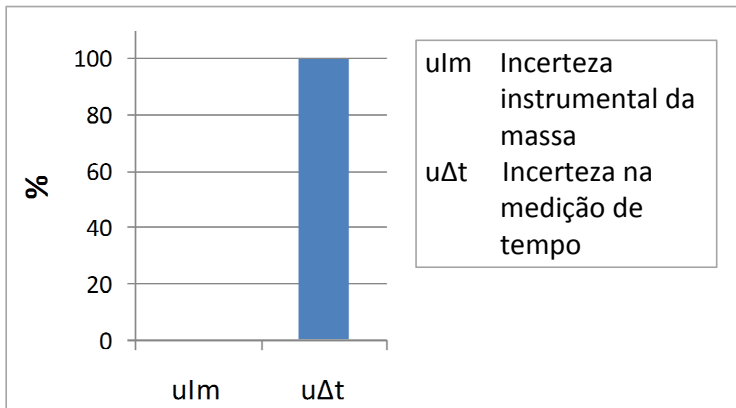
Fonte: Autor

Na Figura 5.3, mostra-se a participação percentual da massa e do tempo na incerteza instrumental da vazão mássica. Percebe-se que a escolha da pior das hipóteses na sincronização dos dados apresenta grande influência na incerteza instrumental da vazão mássica, sendo a incerteza referente à medição do tempo responsável pela quase totalidade da incerteza instrumental da vazão mássica.

Na Figura 5.4, mostra-se na primeira barra da esquerda a participação percentual da incerteza instrumental da vazão mássica obtida com o método gravimétrico. A barra do meio representa a incerteza na repetibilidade da vazão mássica e a barra da direita a incerteza na repetibilidade da vazão mássica instantânea nos ensaios. Nessa figura pode-se perceber que a contribuição da incerteza na repetibilidade da vazão mássica instantânea é quase nula, sendo que a fonte de incerteza com maior peso é a repetibilidade da vazão mássica.

Observa-se na Figura 5.4 que a repetibilidade do valor de vazão mássica entre os diferentes ensaios foi a parcela mais significativa de incerteza tanto na bancada quanto no transdutor Coriolis empregado para comparação dos resultados. Como essa parcela é dominante nos dois métodos de medição e há uma correlação entre os resultados de ambos os métodos, com variações para o mesmo

Figura 5.3: Participação percentual de cada fonte de incerteza na incerteza instrumental na medição da vazão mássica.

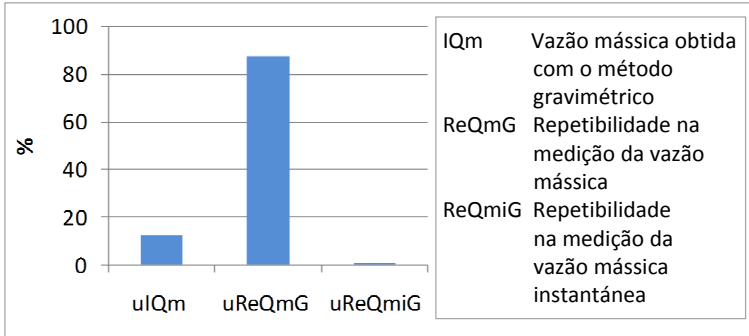


Fonte: Autor

sentido em relação à média dos ensaios nos dois métodos em cada ensaio individual, pode-se inferir que grande parte da parcela considerada como repetibilidade não é devida à repetibilidade propriamente dita. Para que seja obtido o valor da repetibilidade, os ensaios devem ser realizados sempre com a mesma vazão nominal, o que aparentemente não está ocorrendo. Dessa forma, grande parte do que é assumido como repetibilidade deve ser, na realidade, efeito da própria variação da vazão, que é corretamente percebida por ambos os métodos de medição. Dessa forma, caso o valor resultante de cada ensaio seja considerado como o valor nominal, é possível inferir que a incerteza de medição estará superestimada, visto que a repetibilidade não foi obtida em condições de repetibilidade, ou seja, com o mensurando constante. Caso seja desconsiderada a parcela da repetibilidade, a incerteza expandida do segundo protótipo passa a ser de 0,0003 kg/min e a parcela que mais contribui para esse valor é a da incerteza instrumental, que é fortemente influenciada pela estimativa do tempo. Assim, conclui-se que é possível melhorar ainda mais os resultados de incerteza da medição da bancada, de forma significativa, permitindo que a mesma seja avaliada em condições de repetibilidade e substituindo a balança por uma célula de carga que permita a sincronia das medições de massa e de

tempo.

Figura 5.4: Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada da vazão mássica obtida com o método gravimétrico.

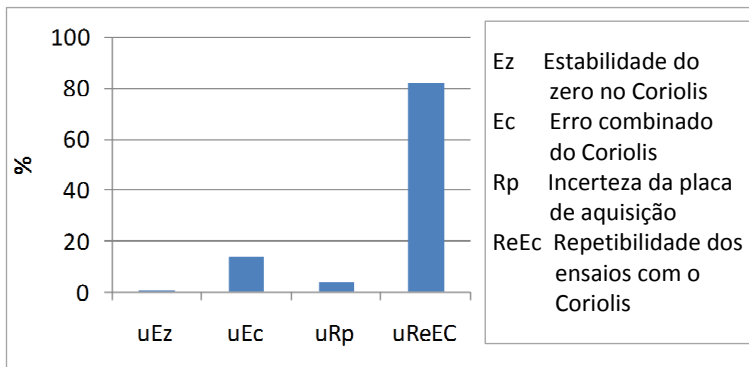


Fonte: Autor

Na Figura 5.5, mostram-se as incertezas do erro combinado no transdutor em avaliação, considerando que o valor de 100% equivale à raiz quadrada da soma dos quadrados de cada um dos termos. Nessa figura é possível perceber que a incerteza da repetibilidade é dominante em relação às demais fontes de incerteza. Realizando a mesma análise já feita para o caso da bancada e desconsiderando a parcela da repetibilidade, a incerteza expandida do transdutor em avaliação passa a ser 0,0013 kg/min. Assim, a razão entre as incertezas do segundo protótipo e do transdutor em avaliação, desconsiderando a repetibilidade nos ensaios, passa a ser de quatro vezes, indicando um comportamento bastante superior da bancada construída em comparação com o medidor que é tido como referência no mercado.

Com os resultados obtidos, mostra-se que os objetivos foram alcançados. Foi conseguido obter um sistema de calibração para medidores de vazão mássica que pode ser empregado para realizar ensaios com diferentes fluidos de trabalho e que apresenta incertezas de medição bastante reduzidas quando comparadas às incertezas dos medidores disponíveis no mercado.

Figura 5.5: Participação porcentual de cada fonte de incerteza na incerteza combinada da medição de vazão com o Coriolis.



Fonte: Autor

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando obter uma bancada com maior facilidade operacional e com menores incertezas de medição, na sequência são mencionadas algumas sugestões:

- dado que a medição do tempo é a fonte de incerteza com maior peso no cálculo da vazão mássica com o método gravimétrico, seria interessante realizar um estudo do erro existente na sincronização das leituras com a finalidade de obter um valor real para não ser necessário utilizar a pior das hipóteses;
- na avaliação da incerteza na compensação das massas para o efeito do empuxo do ar, assume-se que a massa específica dos pesos padrões é um dado conhecido, porém isso não é totalmente verdade. Portanto, seria interessante considerar uma incerteza na massa específica dos pesos padrões para o cálculo da incerteza na compensação das massas;
- adicionar uma válvula entre o tanque pulmão e o transdutor em avaliação para que seja possível ajustar a vazão desejada para o ensaio de forma automática;

- nos ensaios realizados com o segundo protótipo de bancada, foi possível observar que a prateleira na qual está montada a bancada possui um certa inclinação gerada pelo peso dos tanques, logo uma outra sugestão é trocar esta prateleira por uma mais robusta e, se for possível, que possua um sistema que permita graduar a altura entre o tanque pulmão e o transdutor em avaliação. Com essa variação na altura seria possível variar mais facilmente a vazão e empregar uma válvula apenas para realizar o ajuste fino;
- o uso de uma célula de carga que substitua a balança permitiria a leitura direta da massa no recipiente de pesagem, sem influência dos filtros adicionados pela balança e permitindo uma sincronia melhor entre a medição de massa e a medição de tempo. Com isso seria possível minimizar a incerteza na medição do tempo e possivelmente minimizar o tempo de assentamento da medição de massa, minimizando o tempo total de realização dos ensaios.

Adicionalmente, aproveitando que a bancada pode trabalhar com óleos minerais, gasolina e água, seria interessante realizar ensaios com a bancada para avaliar a influência dos diferentes fluidos de trabalho e das propriedades dos fluidos em diferentes tipos de transdutores, que operam com diferentes princípios.

REFERÊNCIAS

- 1 DUNN, W. *Fundamentos de Instrumentação Industrial e Controle de Processos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. (10, v. 1).
- 2 DIAZ, R. Calibração de medidores de vazão. *Intrumentação. Mecatrônica*, n. 25, Outubro 2005.
- 3 INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. Luso - brasileira. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.
- 4 PIÑEIRO, M. *Metrología: introducción, conceptos e instrumentos*. Oviedo, Asturias, España: Universidad de Oviedo, 2000.
- 5 BEAMEX. Porque se debe calibrar? qué riesgo tiene el no calibrar? Março 2009. Disponível em: <<http://resources.beamex.com/why-calibrate>>. Acesso em: 15 jul. 2016.
- 6 KUPHALDT, T. *Lessons In Industrial Instrumentation*. San Francisco, California: Creative Commons Attribution, 2009.
- 7 KROHNE. Calibration technical fundamentals. Março 2013. Disponível em: <http://cdn.krohne.com/dlc/BR_CALIBRATION_en_131112.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2016.
- 8 ANKLIN, M.; DRAHMB, W.; RIEDERB, A. Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research. *Flow measurement and instrumentation*, v. 17, n. 6, p. 317–323, Dezembro 2006.
- 9 MEDIDORES Coriolis Multiváriaveiss. Novembro 2010. Disponível em: <http://www.endress.com.br/Hotsite/Sem_Curitiba/Medidores_Coriolis_Multivariaveiss_.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2016.
- 10 URABE, S.; KIYOAKI, K. Rotamass 3 series coriolis mass flow and density meter. *Yokogawa Technical Report*, v. 53, n. 2, 2010.
- 11 ROSSETO, J. *Análise de fontes de erro na medição de vazão mássica em ensaios de compressores de refrigeração*. Dissertação (Mestrado) — Univeridade Federal de Santa Catarina, 2014.
- 12 RAINER, E.; BEYER, K.; JOACHIM, H. Design and realization of the high-precision weighing systems as the gravimetric references in PTBs national water flow standard. *Measurement Science and Technology*, v. 23, n. 7, Junho 2012.

- 13 LUCAS, N. et al. Ciência à mão. Agosto 2015. Disponível em: <http://www.cienciahao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=lc&cod=_densidadedoslíquidos>. Acesso em: 28 out. 2016.
- 14 RIBEIRO, M. *Medição de Vazão. Fundamentos e Aplicações*. 5. ed. Salvador: , 2003.
- 15 PELLEGRINI, F.; MACH, E.; HEMERLY, A. *Introdução aos Processos Químicos*. Rio de Janeiro, 2001. Apostilla.
- 16 WHITE, F. *Mecânica dos Fluidos*. Rhode Island: McGraw-Hill, 2010.
- 17 BERTULANI, C. Viscosidade, turbulência e tensão superficial. agosto 1999. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/~bertu/fis2/hidrodinamica/viscosidade.html>>. Acesso em: 7 nov. 2016.
- 18 DELMEE, G. *Manual de medição de vazão*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.
- 19 MARTIM, A. *Avaliação do desempenho de um medidor de vazão eletromagnético de um medidor de vazão electromagnético em situações práticas reais de instalação*. Dissertação (Dissertação Mestrado-Curso de Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- 20 RUDROFF, D. Custody transfer: The value of good measurement and the search for the truth. *Pipeline & Gas Journal*, v. 236, n. 7, Julho 2009.
- 21 SHANMUGAVALLI, M.; UMAPATHY, M.; UMA, G. Smart coriolis mass flowmeter. *Measurement*, v. 43, n. 4, p. 549 – 555, Dezembro 2010.
- 22 ABNT (Ed.). *Medidores de vazão de fluidos-NBR 10396*. Rio de Janeiro: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988. 13 p.
- 23 HENRY, M.; MATTAR, W. Coriolis coming of age. *InTech Magazine-ISA Publications*, Novembro 2006. Disponível em: <<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-publications/intech-magazine/2006/november/automation-basics-coriolis-coming-of-age/>>.
- 24 EMERSON. Sua solução para as aplicações de processos mais exigentes. novembro 2013. Disponível em: <<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Micro%20Motion%20Documents/ELITE-CMFS-BRO-POR-MC-001844.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2016.

- 25 YOKOGAWA. Rcc rotamass. novembro 2016. Disponível em: <<http://www.yokogawa.com.br/produtos-e-servicos/sensores-e-instrumentos/medidores-de-vazao-rotamass.html>>. Acesso em: 18 out. 2016.
- 26 BASRAWI, Y. Coriolis force mass flow measurement devices. In: *The Instrumentation, Systems, and Automation Society. The 49th International Instrumentation Symposium*. Orlando, Florida: ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2003. p. 1–11. TP03AERO022.
- 27 FMC ENERGY SYSTEMS. Coriolis mass meters-mass meters for liquid measurement. *FMC Energy Systems*, v. 4, 2005.
- 28 MECATRÔNICA ATUAL. Abril 2013. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1180-medidores-de-densidade-em-linha>>. Acesso em: 21 jul. 2016.
- 29 OFÍCIOS técnicos. Setembro 2015. Disponível em: <<http://www.tecnoficio.com/docs/doc20.php>>. Acesso em: 6 abr. 2016.
- 30 SMART MEASUREMENT. Delta-tubed coriolis mass flow meter. novembro 2016. Disponível em: <<http://www.smartmeasurement.com/delta-tubed-coriolis-mass-flow-meter-p-2.html>>. Acesso em: 18 out. 2016.
- 31 MECÂNICA DOS FLUIDOS. Medidores de vazão. Novembro 2010. Disponível em: <http://wwwmecanicadosfluidos.blogspot.com.br/2010/11/medidores-de-vazao_01.html>. Acesso em: 15 ago. 2015.
- 32 PUCCA, T. Vazão, densidade e viscosidade. Julho 2009. Disponível em: <<http://vazaodensidade.blogspot.com.br/2009/08/medidores-de-vazao-e-densidade-coriolis.html>>. Acesso em: 27 nov. 2016.
- 33 VEIGA, B.; SCHROEDER D.; ROEHE, M. *Construção e Operação de um Medidor de Vazão Volumétrica de Líquidos do Tipo Turbina*. 2010. Relatório, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- 34 LÓPEZ, J. *Calibración de Instrumentos de Medición de Flujo para Conductos Cerrados*. 2011. Trabalho de graduação, Univesidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

- 35 THERMX SOUTHWEST. Manufacturer of custom temperature sensors. 2015. Disponível em: <http://www.thermx.com/Exact_Flow/Exact_Flow_1.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.
- 36 GUO, S. et al. Analysis of viscosity effect on turbine flowmeter performance based on experiment sand cfd simulations; flow measurement and instrumentation. *Flow measurement and instrumentation*, n. 34, p. 42 – 52, Agosto 2013.
- 37 SYSTEM NATIONAL MEASUREMENT. Julho 2015. Disponível em: <http://www.tuvnel.com/_x90lbm/The_Calibration_of_Flow_Meters.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2016.
- 38 ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. *Fundamentos de Metrologia científica e industrial*. Barueri: Manole, 2008.
- 39 PAULO, I. Medição de pressão. Setembro 2015. Disponível em: <http://portalinstrumentacao.blogspot.com.br/2015_09_01_archive.html>. Acesso em: 3 sep. 2016.
- 40 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Measurement of liquid flow in closed conduits-Methodby collectionof the liquid in a volumetric tank-ISO 8316*. New Jersey, 1987.
- 41 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method-ISO 4185*. New Jersey, 1993.
- 42 CHOI, H. et al. Uncertainty evaluation procedure and intercomparison of bell provers as a calibration system for gas flow meters. *Flow measurement and instrumentation*, n. 21, p. 488 – 496, Julho 2010.
- 43 MICRO MOTION. *Model D Sensor Instruction Manual*. Boulder Colorado USA, 1991.
- 44 MICRO MOTION. *Remote Electronics Unit- Transmitter Instruction Manual*. Boulder Colorado USA, 1989.
- 45 MARTE. *Manual de Instruções Balanças Eletrônicas Semi-Analíticas*. São Paulo, 2010.
- 46 TEPRON. *Manual balanças Mrk500 e Mrk4100*. São Paulo: Tepron, 2010.
- 47 ALBERTAZZZI, A. *Metrologia parte I (Apostila)*. Florianópolis: Laboratório de Metrologia e Automatização UFSC, 2002.

- 48 REZENDE, R. Pessagem em química analítica: Correção de empuxo. 2015. Disponível em: <http://www.ipt.br/centro_colunas_interna.php?id_coluna=22&id_unidade=1&qual=colunas>. Acesso em: 18 out. 2016.
- 49 NATIONAL INSTRUMENTS. Timing and synchronization in NI Labview. *National Instruments*, 2014. 15 out. 2016. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/11466/en/>>.
- 50 ARDUINO. Arduino mega 2560. Agosto 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 18 out. 2016.
- 51 RIOVOLT. Fonte de alimentação para computadores PC. Disponível em: <<http://www.riovolt.com.br/FONTE-PC.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2016.
- 52 ADVENTURES IN HOMEBREWING. Chugger pump stainless steel center. Disponível em: <http://www.homebrewing.org/Chugger-Pump-Stainless-Steel-Center_p_3193.html>. Acesso em: 12 jan. 2017.
- 53 HOMEBREWFORUMS. Chugger pump screeching. Dezembro 2011. Disponível em: <<http://homebrewforums.net/discussion/91/chugger-pump-screeching/p1>>. Acesso em: 15 set. 2016.
- 54 NATIONAL INSTRUMENTS. Usb-6009. Setembro 2016. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201987>>. Acesso em: 16 out. 2016.

