

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

Automação de uma Bancada de Calibração de Medidores de Vazão para a Avaliação Experimental da Influência do Fluido de Trabalho

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Hugo Gutierrez Sigolo

Florianópolis, Agosto de 2016

Automação de uma Bancada de Calibração de Medidores de Vazão para a Avaliação Experimental da Influência do Fluido de Trabalho

Hugo Gutierrez Sigolo

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

e aprovada na sua forma final pelo

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Rodolfo César Costa Flesch

Banca Examinadora:

Prof. Rodolfo César Costa Flesch
Orientador no Curso

Prof. Ricardo Jose Rabelo
Responsável pela disciplina

Marina Stasiak, Avaliadora

Andrio Renan Gonzatti Frizon, Debatedor

Fabio Nuno de Oliveira Assunção, Debatedor

Agradecimentos

À minha família, por todo apoio e suporte oferecidos durante todo o decorrer da graduação.

Ao Prof. Rodolfo César Costa Flesch, por toda a orientação e suporte disponibilizados para a realização deste trabalho.

À Miriam Seijas, por toda colaboração e participação na realização deste trabalho.

Resumo

Os processos industriais exigem cada vez mais um controle rigoroso das mais diversas variáveis que os compõem, o que traz um aumento na exigência de desempenho nas medições dessas variáveis. Este fato faz com que os instrumentos utilizados sejam cada vez mais confiáveis quanto a suas características metrológicas. Dessas muitas variáveis medidas em um processo industrial está a vazão, ocupando a terceira posição em número de pontos de medição em ambiente industrial. O projeto proposto prevê a construção e automação de uma bancada de ensaios para calibração de medidores de vazão capaz de permitir a operação com diferentes fluidos. Este trabalho apresenta apenas resultados de calibrações feitas com água, tomando como padrão um medidor de vazão mássica do tipo Coriolis. Os resultados preliminares indicam que os erros entre as medições obtidas com o medidor de vazão e o método de avaliação empregados, são da ordem de 0,8%, com um desvio padrão de 0,03%. Em trabalhos futuros espera-se que sejam avaliados diferentes tipos de transdutores de vazão com variados fluidos de trabalho, de modo a permitir uma caracterização da influência do fluido de trabalho sobre o comportamento dos diferentes princípios de medição de vazão.

Palavras-chave: Automação; Medição de Vazão; Bancada de Calibração.

Abstract

More and more industrial processes require strict control of different process variables, what also increases the performance requirements related to the measurement of these variables. This fact promotes the development of instruments that are more and more accurate. Among these measured processes variables in industrial processes, flow is one of the most measured parameters, ranking third in number of measuring points. The proposed project includes the construction and automation of a test rig for calibration of flow meters which allows operation with different fluids. This document presents only the results of calibrations performed with water, using a Coriolis mass flow meter as a standard for the rig evaluation. Preliminary results indicate that the errors between measurements obtained with the flow meter and the proposed rig are of the order of 0.8%, with a standard deviation of 0.03%. Future studies are expected to evaluate different types of flow transducers with different working fluids, to allow a characterization of the influence of the working fluid on the behavior of different principles of flow measurement.

Keywords: Automation; Flow Measurement; Calibration Bench.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esboço de um escoamento laminar em (a) e de um escoamento turbulento em (b)	22
Figura 2 – Esquemático de um Rotâmetro	28
Figura 3 – Esquemático de um Vertedor	29
Figura 4 – Esquemático de uma calha Parshall	29
Figura 5 – Princípio de funcionamento do medidor eletromagnético	31
Figura 6 – Esquema simplificado do medidor de vazão Tipo Turbina	31
Figura 7 – Esquema simplificado do medidor de vazão Tipo Vórtex	32
Figura 8 – Esquema do medidor de vazão Ultrassônico por efeito Doppler	32
Figura 9 – Esquema do medidor de vazão Ultrassônico por tempo de trânsito	33
Figura 10 – Esquema interno de um medidor Coriolis	34
Figura 11 – Esquema interno de um medidor Coriolis de tubo reto	35
Figura 12 – Comparação do tubo com e sem fluido	35
Figura 13 – Método Gravimétrico [1]	36
Figura 14 – Diagrama de Ishikawa	41
Figura 15 – Bancada de Ensaios	43
Figura 16 – Medidor de Vazão Mássica Coriolis	44
Figura 17 – Balança	46
Figura 18 – Válvula	46
Figura 19 – Esquema Interno da Válvula	46
Figura 20 – Bomba de Alimentação	47
Figura 21 – Placa de Aquisição NI USB-6009	48
Figura 22 – Relé <i>2 Relay Module</i>	49
Figura 23 – Esquema de Comunicação com a Placa de Aquisição NI USB-6009	49
Figura 24 – Representação gráfica da estrutura <i>Flat Sequence</i> em LabVIEW	51
Figura 25 – Estrutura básica do <i>software</i> desenvolvido	52
Figura 26 – Interface com Usuário	53
Figura 27 – Mensagem na Interface com Usuário	53
Figura 28 – Inicialização na Interface com Usuário	53
Figura 29 – Aquisição na Interface com Usuário	54
Figura 30 – Variáveis na Interface com Usuário	54
Figura 31 – Gráficos da Interface com Usuário	55
Figura 32 – Fluxograma da Etapa de Inicialização do <i>Software</i>	55
Figura 33 – Código para Inicialização do Processo	56
Figura 34 – Fluxograma para Verificação dos Equipamentos	57
Figura 35 – Código para Verificação dos Equipamentos	57

Figura 36 – Fluxograma para Adequação de Condições	58
Figura 37 – Código para Adequação de Condições	58
Figura 38 – Fluxograma para Verificação da Inicialização	60
Figura 39 – Código para Verificação da Inicialização	60
Figura 40 – Código para Aquisição de Dados	61
Figura 41 – Fluxograma para Aquisição de Dados do Medidor Coriolis	62
Figura 42 – Código para Aquisição de Dados do Medidor Coriolis	62
Figura 43 – Fluxograma para Aquisição de Dados da Balança	64
Figura 44 – Código para Aquisição de Dados da Balança	64
Figura 45 – Código para Comunicação com a Balança	65
Figura 46 – Código para Aquisição do Último Dado de Massa	66
Figura 47 – Fluxograma para Refinamento de Dados	67
Figura 48 – Código para Refinamento de Dados	67
Figura 49 – Quadro 1 do Refinamento de Dados	68
Figura 50 – Quadro 2 do Refinamento de Dados	70
Figura 51 – Quadro 3 do Refinamento de Dados	71
Figura 52 – Fluxograma para Cálculo dos Resultados dos Ensaios	71
Figura 53 – Código para Cálculo dos Resultados dos Ensaios	72
Figura 54 – Código para Cálculo da Vazão Mássica Média do Medidor Coriolis	72
Figura 55 – Código para Cálculo da Vazão Mássica pela Balança	73
Figura 56 – Código para Cálculo do Erro	73
Figura 57 – Código para Mostrar Último Valor de Massa	74
Figura 58 – Fluxograma para Criação dos Arquivos de Dados	74
Figura 59 – Código para Criação dos Arquivos de Dados	75
Figura 60 – Código para Alteração de Variáveis	76
Figura 61 – Fluxograma para Realização de Ensaios	80
Figura 62 – Diagrama Ishikawa para o Erro na Medição da Massa	84
Figura 63 – Intervalo de Medição para o Medidor Coriolis e para o Método	87

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados de ensaios com massa máxima de 100 gramas	82
Tabela 2 – Resultados de ensaios com massa máxima de 200 gramas	82
Tabela 3 – Resultados de ensaios com massa máxima de 500 gramas	83
Tabela 4 – Resultados de ensaios com massa máxima de 1000 gramas	83
Tabela 5 – Resultados de ensaios para bancada sem automação	87

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANSI: *American National Standards Institute.*

LabVIEW: *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.*

ISO: *International Standard Organization.*

PC: *Personal Computer.*

REU: *Remote Electronics Unit.*

VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos Geral e Específicos	18
1.3	Estrutura do Documento	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Propriedades de Fluidos e Escoamentos	21
2.1.1	Efeito Coriolis	21
2.1.2	Número de Reynolds	22
2.1.3	Viscosidade	23
2.1.4	Densidade	24
2.1.5	Vazão	25
2.2	Princípios de Medição de Vazão	26
2.2.1	Medidor de Vazão por Pressão Diferencial	27
2.2.2	Medidor de Vazão por Perfil Variável	27
2.2.3	Medidor de Vazão em Canais Abertos	28
2.2.4	Medidor Especial de Vazão	29
2.2.4.1	Medidor Eletromagnético de Vazão	30
2.2.4.2	Medidor Tipo Turbina	30
2.2.4.3	Medidor Tipo Vórtex	31
2.2.4.4	Medidor Ultrassônico	32
2.2.4.5	Medidor por Efeito Coriolis	33
2.3	Método Gravimétrico de Calibração de Vazão	35
2.4	Conceitos Metrológicos	38
2.4.1	Termos Metrológicos	38
2.4.2	Erros Sistemáticos e Aleatórios	39
2.4.3	Diagrama de Ishikawa	41
3	BANCADA DE ENSAIOS	43
3.1	Medidor de Vazão Mássica Coriolis	44
3.2	Balança	45
3.3	Válvula	45
3.4	Bomba de Alimentação	46
3.5	Placa de Aquisição NI USB-6009	47
4	SOFTWARE DESENVOLVIDO	51

4.1	Estrutura Geral do <i>Software</i>	51
4.2	Interface com Usuário	52
4.3	Inicialização do <i>Software</i>	55
4.3.1	Verificação dos Equipamentos	56
4.3.2	Adequação de Condições	58
4.3.3	Verificação da Inicialização	59
4.4	Aquisição de Dados	61
4.4.1	Aquisição de Dados do Medidor de Vazão Mássica Coriolis	62
4.4.2	Aquisição de Dados da Balança	63
4.5	Refinamento de Dados	66
4.6	Cálculos dos Resultados dos Ensaios	71
4.7	Criação dos Arquivos de Dados	74
5	METODOLOGIA DE ENSAIOS	77
5.1	Procedimentos Gerais nos Ensaios	77
5.2	Zerar Equipamentos	78
5.2.1	Zerar o Medidor de Vazão Mássica Coriolis	78
5.2.2	Nivelar a Balança	79
6	RESULTADOS OBTIDOS	81
6.1	Tabelas de Resultados dos Ensaios	81
6.2	Cálculos das Incertezas de Medição	83
6.2.1	Incerteza de Medição da Vazão Mássica pelo Método	84
6.2.2	Incerteza de Medição da Vazão Mássica pelo Coriolis	86
6.2.3	Considerações sobre a Automação dos Ensaios	86
7	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 Introdução

Os processos industriais, na atualidade, exigem que cada vez mais ocorram medições das mais diversas variáveis que os compõem. Além disso, é desejável que os equipamentos empregados nessas medições apresentem características metrológicas que sejam adequadas para realizar tais medições, variando de acordo com cada processo. Devido a esse fator, há uma infinidade de tipos diferentes de equipamentos de medição, que aplicam os mais variados métodos, sendo cada um desses tipos indicado para um processo e/ou medição específicos.

A vazão é a terceira grandeza mais medida nos processos industriais [2]. As aplicações são muitas, indo desde aplicações simples como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis, que são medições mais complexas. A escolha correta de um determinado instrumento para medição de vazão depende de vários fatores. Dentre eles, pode-se destacar:

- exatidão desejada para a medição;
- tipo de fluido: líquido ou gás, com ou sem sólidos em suspensão, viscosidade, densidade, entre outros;
- condições termodinâmicas, como pressão e temperatura do fluido e ambiente;
- custo;
- dimensionamento em relação a instalações já presentes ou futuras.

1.1 Motivação

A grande motivação para a construção da bancada de ensaios proposta vem do fato dos medidores de vazão mássica do tipo Coriolis tipicamente serem calibrados através de métodos que utilizam água ou ar seco como fluido de calibração. Porém a utilização desses medidores, principalmente na indústria de petróleo e gás é feita, em grande parte dos casos, com fluidos diferentes dos da calibração.

Com isso pretende-se desenvolver uma bancada de ensaios automatizada para coletar as características metrológicas do medidor de vazão mássica do tipo Coriolis e averigar, por meio de comparação, se as características metrológicas indicadas na calibração são mantidas com a aplicação de fluidos diferentes.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

O objetivo geral do projeto é fazer a automação dos ensaios que serão realizados na bancada de ensaios construída. Para isso devem ser empregados os equipamentos e métodos necessários para que através da bancada de ensaio tenha-se a capacidade de avaliar alguns dos medidores de vazão mássica mais utilizados na indústria de petróleo e gás.

Como objetivos específicos foram definidos:

- criar e automatizar todo o processo de aquisição de dados;
- calcular resultados e erros;
- gerar arquivos dos ensaios;
- validar a bancada de ensaios através do emprego de fluido de trabalho igual ao fluido de calibração. Neste caso para o projeto será utilizado água como fluido e um medidor de vazão mássica do tipo Coriolis como padrão;
- armazenar os dados obtidos nos ensaios de validação para comparação em trabalhos futuros com a alteração do fluido de trabalho;
- eleger o melhor método a ser empregado para a realização dos ensaios e para a montagem da bancada;
- escolher os equipamentos necessários para a montagem da bancada de ensaios.

1.3 Estrutura do Documento

O documento relativo ao projeto desenvolvido está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Revisão da Literatura: traz uma revisão bibliográfica contendo os conceitos teóricos que serão levados em consideração no decorrer da redação do documento e que foram considerados em alguma fase de desenvolvimento prático do projeto;
- Capítulo 3 - Bancada de Ensaio: traz a descrição detalhada de cada um dos equipamentos utilizados na construção e realização de ensaios na bancada de ensaios;
- Capítulo 4 - *Software* Desenvolvido: traz a descrição e explicação detalhada do código do *software* desenvolvido para realizar a automação da aquisição, análise e armazenamento dos dados referentes aos ensaios realizados na bancada de ensaios;

- Capítulo 5 - Metodologia de Ensaio: traz a descrição detalhada da metodologia utilizada para a realização de cada ensaio na bancada de ensaios;
- Capítulo 6 - Resultados Obtidos: traz a exposição e análise dos resultados obtidos com a aplicação da bancada de ensaios;
- capítulo 7 - Conclusão: traz as conclusões sobre o projeto desenvolvido e sugestões de continuação em trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

Neste capítulo serão conceituados os aspectos teóricos utilizados como base para a realização do projeto proposto, bem como sua aplicação e relevância para a compreensão dentro do mesmo. Para tal, o capítulo está dividido em seções, sendo a primeira seção dedicada aos conceitos utilizados para o estudo do medidor de vazão mássica tipo Coriolis, a segunda seção dedicada aos conceitos utilizados para entendimento do método de calibração aplicado e a terceira seção dedicada aos conceitos aplicados na análise dos resultados obtidos.

2.1 Propriedades de Fluidos e Escoamentos

Nesta seção serão apresentados os conceitos importantes para que se tenha o conhecimento de como funciona o medidor de vazão mássica tipo Coriolis, bem como as características dos fluidos aplicados que influenciam de alguma maneira seu comportamento.

2.1.1 Efeito Coriolis

O efeito Coriolis é causado pela ação de uma pseudoforça denominada força Coriolis. A força Coriolis diz respeito a um sistema que é colocado em movimento em relação a uma referência também em movimento, ou seja não inercial, e causa um efeito que somente pode ser percebido por um observador inserido no mesmo sistema referencial, portanto também não inercial [3].

A fórmula que descreve a força Coriolis [4] é dada por (2.1):

$$\vec{F}_{cr} = 2 \cdot m \cdot (\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (2.1)$$

Onde:

- \vec{F}_{cr} representa a força Coriolis;
- m representa a massa do sistema;
- ω representa a velocidade angular do sistema;
- \vec{v} representa a velocidade linear do sistema.

O conhecimento do efeito ou força Coriolis é indispensável para entender como funciona o medidor de vazão mássica tipo Coriolis. As construções físicas e alguns diferentes tipos de medidores Coriolis serão descritos na seção 2.2.4.5.

2.1.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um parâmetro, estudado por Osborne Reynolds, que diz respeito ao escoamento em dutos de fluidos incompressíveis. Esse parâmetro aponta se a vazão do escoamento deste tipo de fluido tem característica laminar ou turbulenta. Um escoamento é dito laminar se as trajetórias desenvolvidas pelas partículas do fluido são bem definidas, ou seja, não mudam de característica durante o escoamento e não tendem a apresentar turbulências. Já um escoamento turbulento ocorre quando as trajetórias desenvolvidas pelas partículas do fluido não são bem definidas, ou seja, as trajetórias mudam de característica durante o escoamento, tornando-se irregulares e, dessa forma, causam turbulência e produzem transferência de quantidade de movimento dentro do fluido [5]. Os escoamentos do tipo laminar e turbulento são mostrados na figura 1.

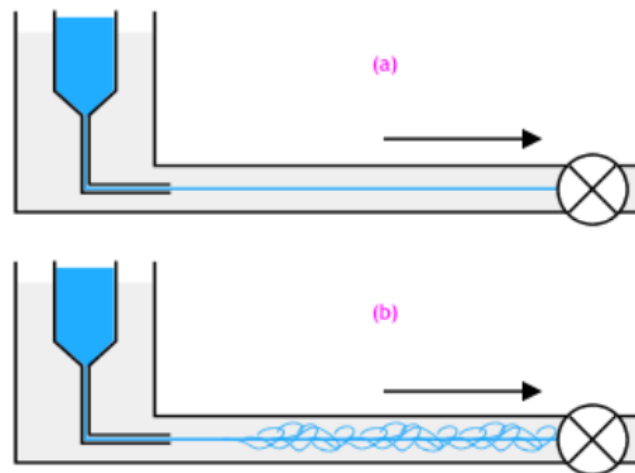


Figura 1 – Esboço de um escoamento laminar em (a) e de um escoamento turbulento em (b)

A característica do escoamento ser laminar ou turbulento é determinada pela faixa de valores atingidos pelo número de Reynolds. Para efeitos práticos, para que um escoamento seja dito laminar, este deve ter um número de Reynolds $Re < 2100$. Para que o escoamento seja dito turbulento, este deve ter um número de Reynolds $Re > 2500$. Na região que está compreendida entre esses valores, ou seja, $2100 < Re < 2500$, não é possível determinar a característica do escoamento, sendo essa uma zona de transição na qual o escoamento não é nem perfeitamente laminar e nem perfeitamente turbulento [6].

Essa característica que é determinada através do número de Reynolds, depende de alguns parâmetros que são inerentes ao fluido e ao escoamento em questão, sendo eles:

- densidade do fluido;
- diâmetro do duto;
- velocidade de escoamento;

- viscosidade do fluido.

Esses parâmetros foram quantificados e se relacionam para formar a equação que descreve o número de Reynolds, equação (2.2), onde pode-se notar que existe uma razão entre densidade e viscosidade do fluido, além do produto entre diâmetro e velocidade:

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (2.2)$$

Onde:

- ρ representa a densidade do fluido;
- D representa o diâmetro do duto;
- v representa a velocidade de escoamento;
- μ representa a viscosidade do fluido.

O número de Reynolds pode também ser interpretado como a relação existente entre as forças de inércia e as viscosas existentes no escoamento do fluido [6], por isso a existência da razão entre densidade (representa a força de inércia) e a viscosidade (representa a força viscosa). Dessa forma, caso o fluido apresente uma elevada viscosidade, o número de Reynolds será baixo, produzindo, provavelmente, um escoamento laminar, devido à menor velocidade de escoamento desse fluido. Já caso o fluido apresente uma viscosidade baixa, o número de Reynolds será alto, produzindo, provavelmente, um escoamento turbulento, devido a sua maior velocidade de escoamento.

2.1.3 Viscosidade

O termo viscosidade diz respeito a uma propriedade inerente aos fluidos em movimento, sendo assim uma propriedade dinâmica. Essa propriedade diz respeito à resistência à deformação que o fluido apresenta em movimento [7] e pode ser comparada com a elasticidade no caso dos sólidos [8]. Portanto, a viscosidade pode ser entendida também como uma forma de atrito interno das partículas adjacentes que constituem o fluido, que dessa forma dificulta o escoamento do mesmo.

A viscosidade tem como características ser uma propriedade termodinâmica, já que pode ser alterada por influência da temperatura e da pressão aplicadas no fluido. Essas alterações causadas na viscosidade por decorrência da mudança de temperatura, fazem com que a viscosidade diminua com o aumento da temperatura, pois as partículas do fluido ficam mais espaçadas com esse aumento de temperatura, o que diminui o atrito entre as mesmas. Ou caso se diminua a temperatura, a viscosidade aumenta, pois há uma

diminuição do espaçamento entre as partículas do fluido, causando mais atrito. Dessa forma, pode-se dizer que há uma relação inversa da temperatura sobre a viscosidade. Já as alterações de pressão que agem na viscosidade, apresentam uma relação direta, uma vez que o aumento da pressão aumenta também a viscosidade, pois o espaçamento entre as partículas diminui. O contrário também é válido, já que a diminuição da pressão causa diminuição da viscosidade, pois o espaçamento entre as partículas aumenta. Um exemplo de fluido que sofre bastante influência da pressão em sua viscosidade são os hidrocarbonetos, uma vez que esses fluidos são bastante compressíveis [9].

2.1.4 Densidade

A densidade pode ser calculada através da razão existente entre a massa e o volume da material analisado, como o expresso na equação (2.3):

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

Onde:

- ρ representa a densidade do material;
- m representa a massa do material;
- V representa o volume do material.

Essa propriedade é de suma importância para o trabalho desenvolvido, pois é uma das variáveis mais relevantes para a medição de vazão. Essa relevância acontece porque é possível se inferir a vazão mássica do escoamento de fluido através de uma relação de multiplicação que existe entre a vazão volumétrica e a densidade do fluido. Essa relação existente pode ser vista algebricamente através da equação (2.5), que descreve o cálculo da vazão volumétrica, e da equação (2.4), que descreve a relação do cálculo da vazão mássica com multiplicação entre a vazão volumétrica e a densidade.

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad (2.4)$$

Onde:

- Q_m representa a vazão mássica;
- Q_v representa a vazão volumétrica;
- ρ representa a densidade.

Os escoamentos nos quais as variações de densidade são desprezíveis denominam-se incompressíveis. Quando as variações de densidade não são desprezíveis, o escoamento é denominado compressível. O exemplo mais comum de escoamento compressível é o escoamento de um gás, enquanto o escoamento de um líquido pode, geralmente, ser tratado como incompressível [11].

2.1.5 Vazão

Ela é definida como a porção volumétrica ou mássica de um fluido que escoar através da seção transversal da tubulação ou canal, através do qual o fluido escoar, por unidade de tempo [2].

A vazão pode ser calculada, principalmente, de duas maneiras diferentes, através do volume de fluido que atravessa a seção transversal do tubo, sendo assim obtida a vazão volumétrica, ou, através da massa de fluido que atravessa a seção transversal do tubo, sendo assim obtida a vazão mássica. Esses dois tipos de vazão são expressos nas equações (2.5), vazão volumétrica, e (2.6), vazão mássica.

$$Q_v = \frac{V}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Onde:

- Q_v representa a vazão volumétrica;
- V representa o volume;
- Δt representa o tempo.

$$Q_m = \frac{m}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Onde:

- Q_m representa a vazão mássica;
- m representa a massa;
- Δt representa o tempo.

2.2 Princípios de Medição de Vazão

A medição de vazão é um dos tipos de medições mais aplicados nos processos industriais em todo mundo, ocupando o terceiro lugar no ranking de número de medições

segundo pesquisas [2]. Devido a esse fato, existe uma infinidade de instrumentos para medição de vazão que são utilizados na indústria, cada qual seguindo um método de medição diferente e específico, ou mais adequado, para cada tipo de processo. Nesta seção serão apresentados alguns dos principais tipos de instrumentos de medição de vazão e algumas de suas características.

Com o avanço da tecnologia e com o aumento do rigor do controle de qualidade, cada vez mais são exigidos parâmetros de alto desempenho, como por exemplo, em sistemas que apresentam transferência de custódia, uma vez que nesse tipo de sistema o erro de medição implica em grande prejuízo financeiro para aqueles que estão envolvidos. Um exemplo de parâmetro importante para um medidor de vazão é a incerteza de medição - parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando [12] - que para a transferência de custódia, de acordo com a Legislação do petróleo da ANP, deve ter incerteza máxima de 0,3% [13].

Primeiramente, os medidores de vazão se dividem em dois grandes grupos, os medidores de vazão de quantidade, que são aqueles que permitem saber a quantidade de fluido que escoou, porém não a vazão de fluido que está escoando, e os medidores de vazão volumétricos, que são aqueles que exprimem a vazão por unidade de tempo.

Os medidores de vazão de quantidade são ainda divididos em dois subgrupos, os medidores de quantidade por pesagem e os medidores de quantidade volumétrica. Os medidores de quantidade por pesagem são aqueles utilizados para a medição de sólidos, como por exemplo, as balanças industriais. Já os medidores de quantidade volumétrica são aqueles utilizados para medição de fluidos que estão passando pelo mecanismo de medição, e assim causam o acionamento de mecanismo de indicação. Dessa forma, a grandeza efetivamente medida é o volume total deslocado, sendo necessária a existência de uma base de tempo para que se calcule a razão entre eles, de modo a determinar a vazão. Alguns exemplo desses medidores de vazão de quantidade volumétrica são os tipo pistão rotativo oscilante, disco nutante, tipo pás, entre outros [14].

Os medidores de vazão volumétricos são os mais utilizados na indústria de maneira geral, apresentando uma gama de tipos construtivos bastante abrangente, sendo eles:

- medidor de vazão por pressão diferencial;
- medidor de vazão por pressão diferencial constante;
- medidor de vazão em canais abertos;
- medidor especial de vazão (turbina, eletromagnético, ultrassônico, entre outros).

2.2.1 Medidor de Vazão por Pressão Diferencial

Este tipo de medidor de vazão utiliza como meio de medição de vazão uma queda de pressão que é causada na tubulação pela qual escoo o fluido de interesse. Essa queda de pressão pode ser produzida por diferentes métodos ou elementos primários inseridos na tubulação de forma que o fluido os atravesse. Assim, a partir da queda de pressão causada por esses elementos inseridos na tubulação, a vazão pode ser inferida, sendo esse portanto, uma medição de vazão de forma indireta [14].

Esses medidores de vazão têm como principal vantagem a grande gama de processos na qual eles são aplicados, podendo ser utilizados na medição da maioria dos gases e líquidos, fluidos viscosos e fluidos com sólidos em suspensão, além de possuírem faixas de temperatura e pressão de operação bastante amplas [14].

Já a principal desvantagem para esse tipo de medidor de vazão é a perda de carga causada pela aplicação desses equipamentos, sendo que alguns dos métodos utilizados podem causar até 80% de perda de carga [14]. Esta perda de carga ocorre porque os dispositivos utilizados para gerar a diferença de pressão na tubulação são inseridos dentro da mesma, causando uma mudança de tamanho da seção transversal, tornando-a menor e, assim, dificultando o escoamento naquela região.

Os tipos mais comuns de dispositivos utilizados como elementos primários para os medidores de vazão por pressão diferencial são:

- placa de orifício;
- orifício integral;
- tubo de Venturi;
- bocal;
- tubo de Pitot;
- medidor tipo Annubar.

2.2.2 Medidor de Vazão por Perfil Variável

Esse tipo de medidor de vazão, assim como o descrito na seção 2.2.1, utiliza como meio de medição uma queda de pressão gerada na tubulação pela qual escoo o fluido. Porém, os medidores de vazão por pressão diferencial constante são capazes de modificar sua área de restrição, que cria a queda de pressão, de acordo com a mudança de vazão, mantendo assim a queda de pressão constante [14]. Este método faz com que haja uma menor perda de carga na região na qual está instalado o instrumento de medição. O

exemplo mais utilizado para medidores de vazão que utilizam este método é o rotâmetro, mostrado na figura 2.

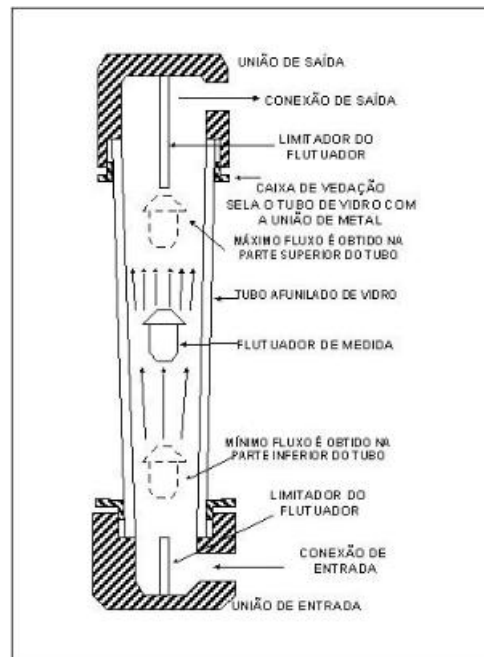


Figura 2 – Esquemático de um Rotâmetro

O rotâmetro é um medidor de vazão que utiliza a posição final que seu flutuador assume com a aplicação de vazão de fluido através do medidor. O rotâmetro é posicionado verticalmente, de modo que o fluido escoe da entrada, na parte inferior do instrumento, para a saída, na parte superior. Assim, uma força de arraste é aplicada sobre o flutuador, que é deslocado até a posição de equilíbrio, que corresponde à vazão volumétrica de fluido que atravessa o medidor [15].

2.2.3 Medidor de Vazão em Canais Abertos

Os medidores de vazão em canais abertos utilizam-se da altura estática do fluido para inferir a vazão. Existem dois principais tipos de medidores de vazão em canais abertos: o tipo vertedor e a calha Parshall. Ambos realizam medição de vazão de forma indireta, uma vez que utilizam outros parâmetro para calcular a vazão, neste caso a altura no reservatório.

Os medidores de vazão em canais abertos do tipo vertedor, mostrado na figura 3, utilizam-se de tanques que possuem uma placa perpendicular ao fluxo de escoamento. Essa placa possui um entalhe, com o objetivo de fazer o fluxo escoar através do mesmo, uma vez que a placa faz com que o fluxo pare de escoar e suba até ser capaz de verter pelo entalhe. Dessa forma, mede-se a altura estática do fluido e se infere a vazão do mesmo [16].

Os medidores de vazão em canais abertos do tipo calha Parshall, mostrada na figura

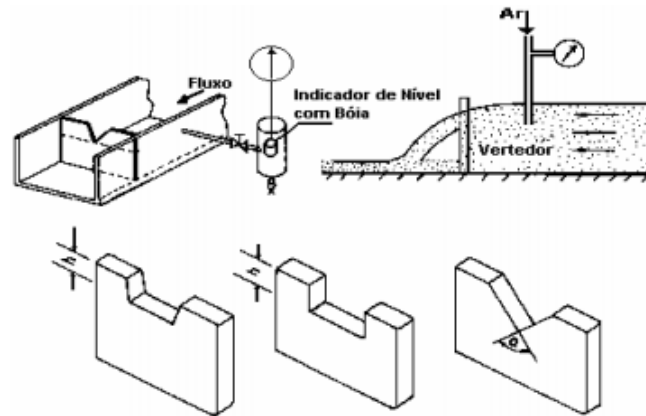


Figura 3 – Esquemático de um Vertedor

4, são estruturas construídas em um trecho curto de canal com uma geometria que diminui a área transversal do canal, criando uma passagem mais estreita para o fluido, fazendo com que aumente a velocidade de escoamento. Essa diminuição da seção transversal onde o fluido escoava provoca um aumento de nível de fluido no ponto onde é instalada a calha Parshall, e a medição desse nível pode ser relacionada com a vazão [17]. Esse método de medição é mais vantajoso quando comparado ao método aplicando vertedor, pois gera menor perda de carga e, ainda, pode ser utilizado para medição de fluido com sólidos em suspensão [14].

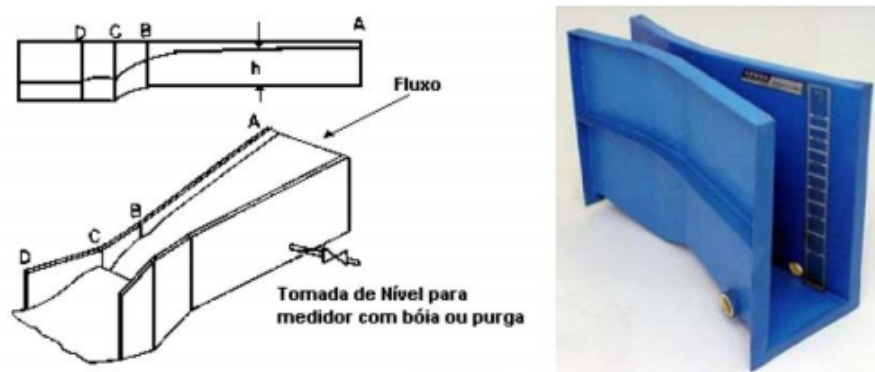


Figura 4 – Esquemático de uma calha Parshall

2.2.4 Medidor Especial de Vazão

Os medidores especiais de vazão são aqueles que aplicam métodos de detecção de vazão através de diferentes fenômenos físicos. Os tipos mais comuns são:

- medidor eletromagnético;
- medidor tipo turbina;

- medidor tipo vórtex;
- medidor ultrassônico;
- medidor por efeito Coriolis.

2.2.4.1 Medidor Eletromagnético de Vazão

Os medidores eletromagnéticos de vazão são aqueles que baseiam seu funcionamento na lei de Faraday. Seguindo esse princípio, quando acontece o deslocamento de um material condutor através de um campo magnético, ocorre a geração de uma força eletromotriz que é proporcional à intensidade do campo magnético, à velocidade de deslocamento do fluido e ao diâmetro da tubulação. Dessa forma, quando um fluido condutor elétrico se desloca com velocidade perpendicular a um campo magnético, é produzida uma força eletromotriz que pode ser medida através de eletrodos instalados em torno à tubulação onde ocorre o escoamento [18]. Esse fenômeno está ilustrado na figura 5. O método aplicado leva a uma medição de vazão indireta, uma vez que a variável medida é a força eletromotriz e que é necessário empregar a equação (2.7), para obter-se a vazão:

$$Q = e \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \frac{D}{B} \quad (2.7)$$

Onde:

- Q representa a vazão;
- e representa a força eletromotriz;
- D representa a distância entre os eletrodos;
- B representa o campo magnético.

Para que se possa utilizar esse tipo de medidor é necessário que o fluido apresente características de condutor de eletricidade. Isso faz com que a aplicabilidade do método seja reduzida a fluidos condutivos e não magnéticos. Assim, os medidores eletromagnéticos de vazão são muito empregados em indústrias químicas e de papel e celulose, devido à características dos fluidos presentes nesses tipos de indústria [18].

2.2.4.2 Medidor Tipo Turbina

Os medidores de vazão do tipo turbina possuem um princípio de funcionamento bastante simples, sendo utilizados na indústria desde os anos 40. Esses medidores utilizam turbinas que são inseridas na tubulação onde ocorre o escoamento, de modo que possam girar livremente e, assim, captar a velocidade do escoamento. Para realizar a medição, é

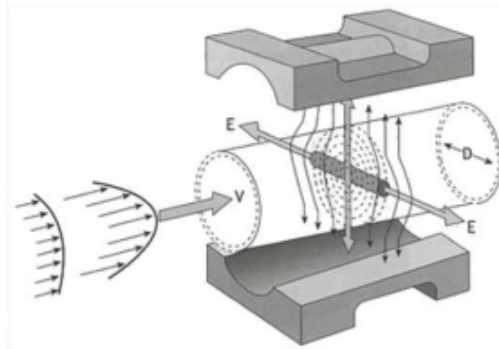


Figura 5 – Princípio de funcionamento do medidor eletromagnético

instalado um sensor que capta todo momento no qual um ponto pré definido da turbina passa por ele, determinando a taxa de rotação. Os medidores de vazão do tipo turbina são amplamente utilizados por sua simplicidade, baixo custo e sua alta exatidão, apresentando incertezas até mesmo na casa dos 0,25%. Além disso, a perda de carga ocasionada pela utilização da turbina em meio à tubulação é bastante pequena, principalmente para fluidos líquidos, onde são utilizados, geralmente, apenas duas lâminas [19]. A figura 6 mostra o esquema simplificado de um medidor de vazão tipo turbina.

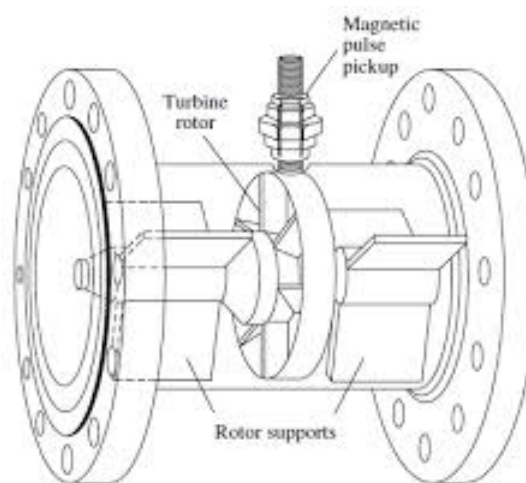


Figura 6 – Esquema simplificado do medidor de vazão Tipo Turbina

2.2.4.3 Medidor Tipo Vórtex

Os medidores de vazão do tipo vórtex, mostrado na figura 7, são aqueles que utilizam algum tipo de aparato a fim de causar vórtices no fluido. Os aparatos utilizados são hastes anti-aerodinâmicas que são inseridas na tubulação com o objetivo de obstruir parcialmente o escoamento do fluido, causando os vórtices. A medição é feita através de transdutores que transformam os esforços mecânicos exercidos sobre a haste em sinais elétricos e cada pulso é proporcional a um determinado volume fixo de fluido [20].

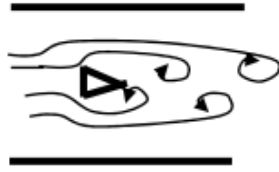


Figura 7 – Esquema simplificado do medidor de vazão Tipo Vórtex

2.2.4.4 Medidor Ultrassônico

Os medidores de vazão ultrassônicos são aqueles que utilizam como método de medição de vazão a velocidade de propagação do som no fluido escoando na tubulação. Os transdutores que fazem essa medição de velocidade podem ser presos tanto na superfície externa quanto na interna da tubulação, onde emitem, de um lado da tubulação, o sinal ultrassônico através do fluido e captam, do outro lado da tubulação, o sinal acústico correspondente [14]. Os medidores de vazão ultrassônicos são divididos em duas categorias que utilizam diferentes métodos de medição, os por efeito Doppler e os por tempo de trânsito. Os medidores ultrassônicos de efeito Doppler, mostrado na figura 8, são utilizados em fluidos que possuem partículas com capacidade de refletir as ondas acústicas, uma vez que o efeito Doppler consiste na aparente variação de frequência causada pelo movimento entre o emissor e o receptor de onda acústica.

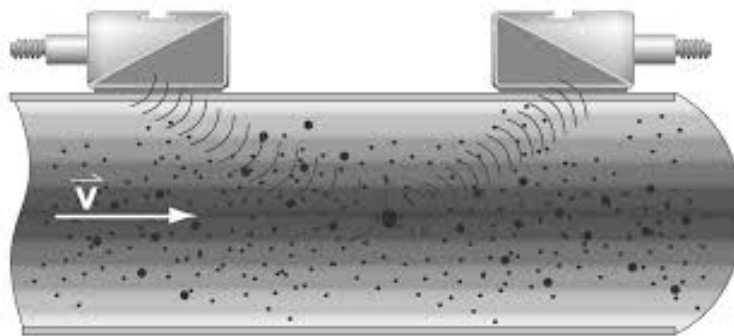


Figura 8 – Esquema do medidor de vazão Ultrassônico por efeito Doppler

Já o medidor ultrassônico de tempo de trânsito, mostrado na figura 9, deve ser utilizado apenas em fluidos limpos, ou seja, sem a presença de partículas, uma vez que elas causariam erros na medição realizada pelo instrumento. Isso porque o medidor ultrassônico de tempo de trânsito utiliza um transdutor com o par emissor/receptor fixos externamente à tubulação em lados opostos, e estes emitem ondas ultrassônicas que são recebidas pelo seu par receptor. Caso haja defasagem de tempo nas recepções dos receptores, isso indica que há vazão de fluido. O tempo de defasagem é utilizado para o cálculo da velocidade do escoamento, que posteriormente é processada para servir como base para o cálculo da vazão do fluido [14].

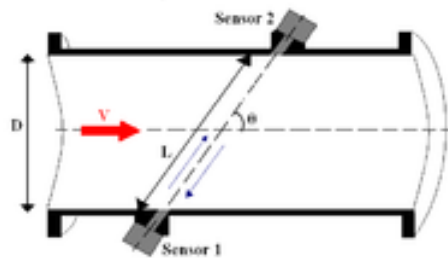


Figura 9 – Esquema do medidor de vazão Ultrassônico por tempo de trânsito

2.2.4.5 Medidor por Efeito Coriolis

Os medidores de vazão por efeito Coriolis se utilizam do efeito causado pela força Coriolis para aferir a vazão mássica de fluido que escoar pela tubulação. Esse modelo de medidor é um dos poucos tipos de medidores de vazão que realiza a medição da vazão mássica do fluido.

Os medidores de vazão por efeito Coriolis apresentam grande crescimento de seu uso na indústria, tendo uso cada vez mais crescente em diversos ramos da indústria, como farmacêutica, química, alimentícia, de papel e celulose, petróleo, entre outros. O aumento recente das suas aplicações, está relacionado com as características metrológicas apresentadas pelo medidor. Além disso, outro fator bastante importante para o crescimento do seu uso é a facilidade que o medidor de vazão por efeito Coriolis proporciona em suas medições, uma vez que a medição de vazão é independente de características dos fluidos que influenciam na mesma, como densidade, viscosidade e condutibilidade, uma vez que o medidor faz a compensação automática de qualquer mudança nessas características.

Além das vantagens já mencionadas, há outras bastante relevantes para a utilização do medidor de vazão por efeito Coriolis, como por exemplo, sua elevada robustez, já que o mesmo não apresenta partes móveis ou removíveis no seu processo de medição e, dessa forma, a probabilidade de haver a necessidade de recalibração após um curto espaço de tempo de uso é bastante pequena. Outra vantagem bastante interessante do medidor de vazão por efeito Coriolis é o fato de o mesmo apresentar uma grande versatilidade em relação às grandezas que podem ser medidas com ele, já que o medidor possui medições de vazão mássica, densidade e temperatura, além de medições indiretas de viscosidade e vazão volumétrica.

Porém o medidor de vazão por efeito Coriolis também apresenta algumas desvantagens que restringem seu uso em alguns tipos de processos. Essas desvantagens derivam principalmente do seu aspecto construtivo, pois o medidor possui limitações quanto às bitolas das tubulações onde são instalados, não podendo estas serem maiores que 300mm (12 polegadas), e também quanto a temperatura do fluido em escoamento, que deve variar

na faixa de -200°C a $+400^{\circ}\text{C}$ [21].

Um medidor Coriolis é composto, basicamente, por dois componentes: tubos de sensores de medição e transmissor. Nos tubos de medição, é aplicada uma oscilação que faz com que eles oscilem em uma frequência natural de baixa amplitude, através da bobina de vibração mostrada na figura 10. Quando um fluido qualquer é escoado através do tubo em oscilação, o efeito Coriolis se manifesta causando uma deformação na forma de uma torção, que é captada por meio de sensores magnéticos que geram uma tensão em formato de ondas senoidais. Essa torção causa um efeito de oposição à passagem do fluido na entrada e uma aceleração do fluido na saída. Esses efeitos são captados por meio dos sensores presentes nos tubos do medidor, representados na figura 10 pelo conjunto ímã e bobina. Dessa forma, a vazão mássica é determinada como sendo diretamente proporcional ao atraso entre a entrada e a saída dos tubos [22].

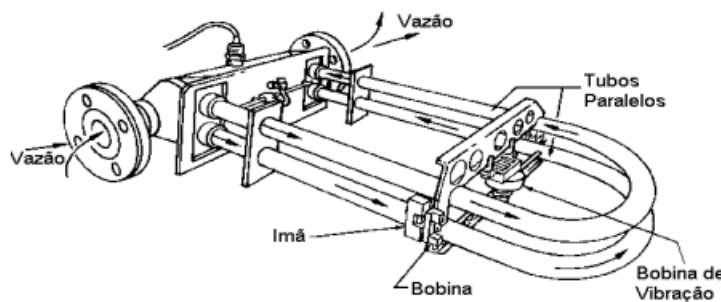


Figura 10 – Esquema interno de um medidor Coriolis

O transmissor é dispositivo composto de um circuito eletrônico que gera um sinal para os tubos de vazão, alimenta e recebe o sinal de medida, propiciando saídas analógicas em intervalos padronizados, como (4 a 20) mA ou (0 a 10) V, de frequência (0 Hz a 10 kHz, por exemplo) e até digitais, como RS 232 ou RS 485.

Além dos medidores com configuração convencional de tubo em U, mostrado na figura 10, podem ser encontrados modelos com tubo reto, como mostrdo na figura 11. Nesse modelo, um tubo de medição oscila sobre o eixo A-B sendo percorrido por um fluido com velocidade v . Entre os pontos A-C as partículas do fluido são aceleradas, o que gera uma força Coriolis (F_c) oposta à direção de escoamento. Entre os pontos C-B as partículas do fluido são desaceleradas o que leva a uma força Coriolis no mesmo sentido do escoamento. A representação deste fenômeno pode ser observada na figura 12. A força de Coriolis (F_c), a qual atua sobre as duas metades do tubo com direções opostas, é diretamente proporcional à vazão mássica. O método de detecção é o mesmo do presente em medidores de tubo em U [22].

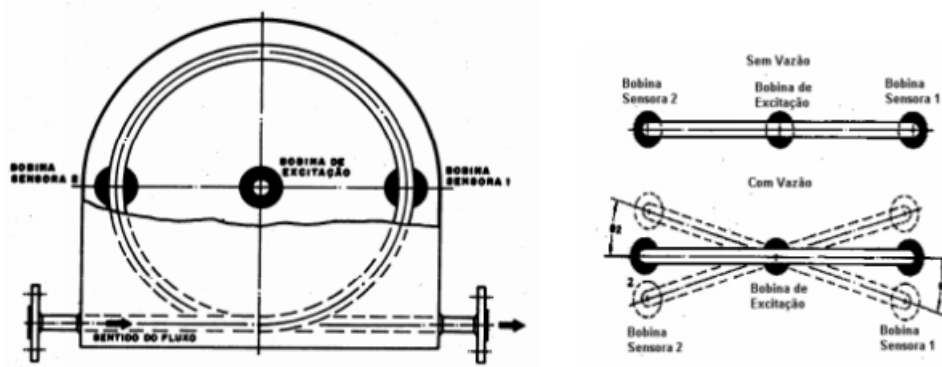


Figura 11 – Esquema interno de um medidor Coriolis de tubo reto

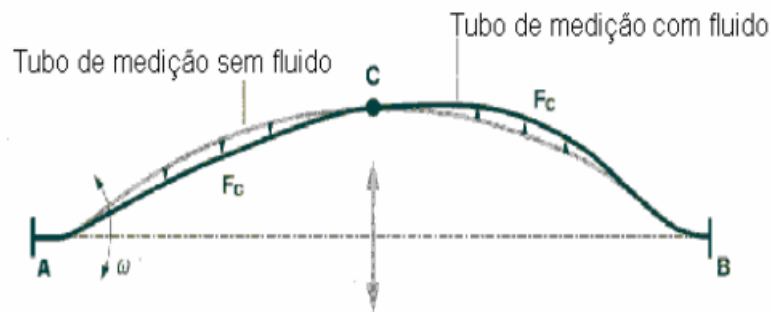


Figura 12 – Comparação do tubo com e sem fluido

2.3 Método Gravimétrico de Calibração de Vazão

Nesta seção serão apresentados os conceitos importante para o conhecimento e entendimento do método de calibração aplicado na bancada de ensaios proposta, além de aspectos que influenciam na aplicação do método.

Na literarura existem diversos métodos de calibração e construção de bancadas, cada qual com suas características distintas para cada tipo de aplicação na são utilizados. O método escolhido como base para a construção da bancada de ensaios e medições realizadas no mesmo foi o método gravimétrico.

O método gravimétrico, que possui o esquema mostrado na figura 13, sendo também utilizado como base para construção da bancada de ensaios, que será descrita no capítulo 3, consiste em um método para determinação da massa de fluido escoado ou contido em um recipiente a calibrar [23]. A medida de massa que se deseja determinar deve ser realizada em duas etapas, sendo uma com o recipiente contendo o fluido e outra com o recipiente vazio [24].

Com a aplicação do método gravimétrico, diversas medidas e variáveis podem ser obtidas através das relações existentes entre elas. Para a bancada desenvolvida, os

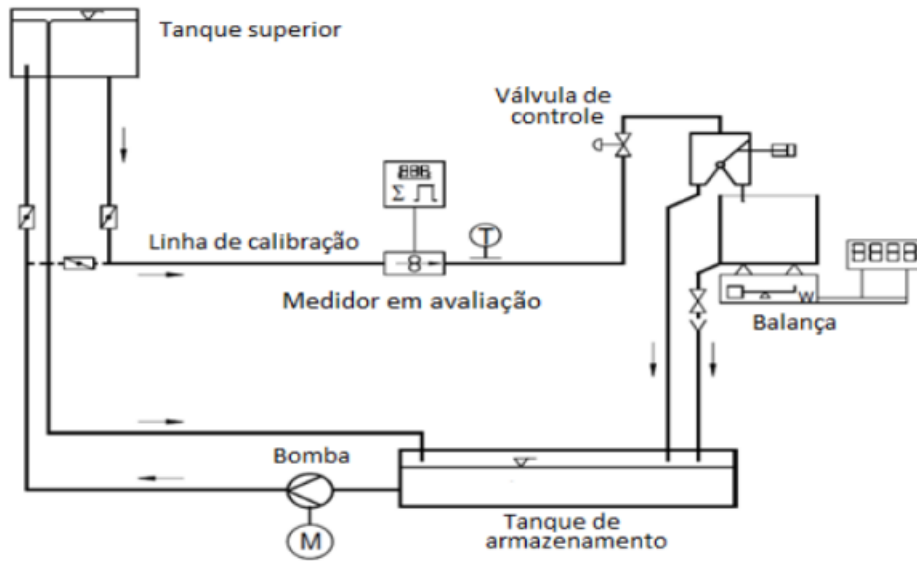


Figura 13 – Método Gravimétrico [1]

principais mensurandos obtidos são a média da vazão mássica, expressa na equação (2.8), e a massa total, expressa na equação (2.9).

$$\bar{Q}_m = \frac{m_{ref}}{t_{med}} \quad (2.8)$$

Onde:

- \bar{Q}_m representa a vazão mássica média;
- m_{ref} representa a massa medida;
- t_{med} representa o tempo decorrido do ensaio.

$$m = \int_0^{t_{med}} Q_m(t) dt = \bar{Q}_m \cdot t_{med} \quad (2.9)$$

Onde:

- m representa a massa total;
- $Q_m(t)$ representa a vazão mássica no tempo;
- \bar{Q}_m representa a vazão mássica média;
- t_{med} representa o tempo decorrido do ensaio.

O método gravimétrico, como mostrado na figura 13, é composto basicamente de três partes essenciais:

- sistema de geração de vazão: é composto pelo tanque de armazenamento e pela bomba que controla a vazão de fluido, podendo apresentar também um reservatório que seja capaz de auxiliar na estabilização da vazão, como o tanque superior;
- linha de calibração: formado pela tubulação na qual circula o fluido e onde deve ser posicionado o medidor em avaliação;
- desviador: é o equipamento, controlado eletricamente, capaz de mudar o fluxo de fluido do caminho tanque superior ao tanque de armazenamento, para o caminho tanque superior a balança.

O método gravimétrico apresenta uma metodologia que deve ser aplicada para o processo de medição de vazão que pode ser considerada simples. Primeiro deve-se estabelecer as condições iniciais de operação, como uma vazão estável, temperatura e pressão bem definidas e condicionadas, a balança deve estar zerada e estabilizada. Após esses parâmetros serem atingidos, pode-se iniciar o ensaio de medição de vazão. Para isso o desviador de fluxo deve alterar o fluxo para o caminho que leva à balança. Feito isso, o ensaio é iniciado e é realizado até que a condição de parada ocorra, ou seja, até que seja atingida uma massa de fluido predefinida sobre a balança, ou que uma altura de fluido predefinida seja atingida no reservatório da balança. Quando a condição de parada ocorre, o desviador de fluxo redireciona o fluido para o caminho padrão tanque superior ao tanque de armazenamento. O tempo decorrido para que se atinja a condição de parada a partir do momento que o fluxo é direcionado para a balança é determinado como o tempo necessário para o ensaio, correspondendo ao parâmetro t_{med} da equação (2.8). Já o valor de massa de fluido sobre a balança corresponde ao parâmetro m_{ref} , também da equação (2.8).

Como a massa é uma medida estática, algumas características dinâmicas do processo são fontes de perturbação para a medição da mesma. As principais características dinâmicas inerentes ao processo que causam algum tipo de perturbação na medição da massa são [1]:

- ondulações presentes no reservatório posicionado sobre a balança causadas pela adição de fluido no mesmo;
- força causada pela queda do fluido sobre a balança;
- evaporação do fluido depositado sobre a balança;
- vibrações e ruídos causados devido a circulação de fluido nos componentes da bancada.

No que diz respeito à escolha do método, a mesma foi feita pelo desempenho que pode ser atingido com ele. O método gravimétrico é o que possui os melhores valores de incerteza quando utilizado para a calibração de vazões de líquido [1]. Isso ocorre porque o

princípio físico que rege o método é muito bem comportado e não precisa de influência humana ou de qualquer outra fonte externa para ocorrer. Dessa forma, o elemento mais crítico do método é a balança ou célula de carga utilizada, que deve ser escolhida de acordo com as características dos ensaios que serão realizados, bem como as características metrológicas que serão tomadas como base para avaliação dos resultados.

2.4 Conceitos Metrológicos

Nesta seção serão apresentados os conceitos que serão utilizados para a realização da análise dos resultados obtidos com a bancada de ensaios proposta.

2.4.1 Termos Metrológicos

Nesta seção serão descritos alguns termos metrológicos mencionados ao longo dos próximos capítulos [25].

- Grandeza: propriedade dum fenômeno dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência.
- Medição: processo de obtenção experimental dum ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza.
- Metrologia: ciência da medição e suas aplicações.
- Procedimento de medição: descrição detalhada duma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada num modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado à obtenção dum resultado de medição.
- Resultado de medição: conjunto de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível.
- Instrumento de medição: dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares.
- Exatidão de medição: grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando.
- Precisão da medição: grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas.
- Erro de medição: diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência.

- Repetibilidade de medição: precisão de medição sob um conjunto de condições de repetibilidade.
- Condições de repetibilidade de medição: condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.
- Incerteza de medição: parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.
- Incerteza padrão combinada: incerteza padrão obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada num modelo de medição.

2.4.2 Erros Sistemáticos e Aleatórios

O estudo da teoria de erros é de suma importância para um melhor entendimento dos resultados que são obtidos em uma medição de uma grandeza física, já que todo resultado de medição é uma aproximação para o valor verdadeiro da grandeza medida. Assim, a teoria de erros tem como objetivo principal obter o melhor valor possível para o mensurando a partir dos dados experimentais, ou seja, determinar o melhor valor de aproximação para o valor real da grandeza, por meios estatísticos. Além disso, visa também obter a incerteza relacionada ao valor obtido, ou seja, determinar também em termos estatísticos os graus de confiança e exatidão do valor medido da grandeza [26].

Os erros que podem ocorrer durante a medição de uma grandeza são muitos, sendo basicamente divididos em dois grandes grupos: os erros sistemáticos e os erros aleatórios.

Segundo o VIM (2012, p.21), o conceito de erro sistemático diz respeito à um "componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível". Ou seja, considerando um conjunto de x_i medições, onde $i = (1, 2, \dots, n)$, de uma grandeza o erro sistemático é aquele que afeta igualmente todas as n medições x_i . Dessa forma todo o conjunto apresenta um deslocamento igual em relação ao valor verdadeiro da grandeza.

Vários fatores inerentes à medição de uma grandeza podem causar erros sistemáticos nas medidas, sendo os principais:

- erro sistemático observacional: erro devido a falhas do procedimento ou do observador, como o erro de paralaxe na leitura de escalas de diversos instrumentos;
- erro sistemático instrumental: erro devido a falta ou erro na calibração dos instrumentos;

- erro sistemático ambiental: erro devido a efeitos causados pelo ambiente sobre o ensaio, como fatores ambientais de temperatura, pressão, umidade que podem alterar as características físicas de um fluido.

O erro sistemático representa a diferença entre a média dos valores de sucessivas medições de um mensurando e o valor verdadeiro do mensurando. Assim, o erro sistemático pode ser calculado através da equação 2.10 [27]:

$$E_s = \bar{X} - VVC \quad (2.10)$$

Onde:

- E_s representa o erro sistemático;
- \bar{X} representa a média das x_i medições;
- VVC representa o valor verdadeiro convencionado da grandeza.

Já segundo o VIM (2012, p.22), o conceito de erro aleatório diz respeito à "componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível". Ou seja, é a medida da dispersão dos n resultados de medição x_i em torno do valor verdadeiro da grandeza. Esse tipo de erro resulta em variações aleatórias nas medições realizadas, sendo mais difíceis tanto de serem contornados quanto identificados. Um exemplo de erro aleatório inerentes ao projeto é a medição de massa com a balança que pode apresentar componentes de erro aleatório devido a correntes de ar e vibrações no instante da medição.

O erro aleatório pode ser analisado numericamente através do valor de desvio padrão de um conjunto de medidas, que nada mais é que a dispersão das leituras feitas com um instrumento de medição. O desvio padrão pode ser calculado através da equação 2.11 [27]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.11)$$

Onde:

- σ representa o desvio padrão;
- x_i representa as sucessivas medições da grandeza;
- \bar{X} representa a média das x_i medições;
- n representa o número de medições realizadas.

2.4.3 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa foi desenvolvido por *Kaoru Ishikawa*, que consiste em uma ferramenta de análise de fácil utilização, permitindo abordar tanto problemas simples quanto mais complexos inerentes à um processo, podendo ser aplicado em inúmeras áreas. O diagrama de Ishikawa é também conhecido como diagrama de Causa e Efeito ou diagrama Espinha de Peixe [28].

O diagrama de Ishikawa mostra a relação entre uma característica de qualidade (efeito) e os seus fatores (causa), como mostrado na figura 14. Em certas aplicações o número de fatores (causas) pode ser muito elevado, dessa forma pode-se dividir o diagrama principal em outros subdiagramas, onde uma determinada causa primária torna-se um efeito no novo diagrama, com as causas secundárias associadas à ele tornando-se as causas primárias desse diagrama.

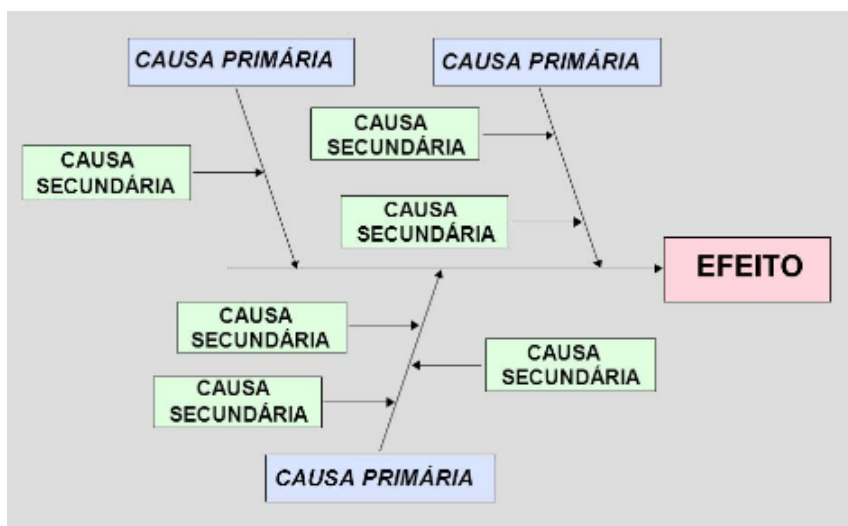


Figura 14 – Diagrama de Ishikawa

Para a construção de diagrama de Ishikawa deve-se seguir um procedimento que pode ser dividido em duas fases distintas, primeiro deve-se fazer o levantamento da maior quantidade de possíveis causas e depois deve-se fazer um arranjo dessas causas. O procedimento completo é realizado através dos passos seguintes:

- estabelecer o efeito (característica) da qualidade principal;
- encontrar o maior número possível de causas que possam afetar o efeito principal;
- definir as relações entre as causas e construir um diagrama de causa e efeito, ligando os elementos como efeito principal por relações de causa e efeito;
- estipular uma importância para cada causa e assinalar as causas particularmente importante, que pareçam ter um efeito significativo no efeito principal;

- registrar qualquer informação necessária.

O uso do diagrama de Ishikawa traz facilidade na identificação de causas de possíveis problemas, além de facilitar também a análise dos mesmos, proporcionando tomadas de decisões mais seguras e acertivas.

3 Bancada de Ensaio

Neste capítulo será descrita e mostrada a bancada de ensaios que foi desenvolvida durante o projeto, bem como os principais componentes e equipamentos que foram empregados na construção da mesma.

Na figura 15 é mostrada a construção final da bancada de ensaios, com todos os componentes e equipamentos utilizados para tal.



Figura 15 – Bancada de Ensaio

O fluxo de fluido na bancada ocorre da seguinte forma: o fluido fica depositado no tanque de descarga (tanque inferior da figura 15), até que seja enviado para o tanque reservatório (tanque superior da figura 15). No tanque superior existem três saídas de fluido, duas de segurança e uma de linha. Às saídas de segurança estão conectadas mangueiras de

1 polegada de diâmetro, que garantem que o tanque não transborde. A saída de linha está conectada ao medidor de vazão mássica Coriolis (no lado direito da figura 15). Ao sair do medidor Coriolis, o fluido entra na válvula de três vias, que faz o controle do caminho que será seguido pelo fluido. Na válvula o fluido pode ser direcionado para dois caminhos distintos, sendo um de volta ao tanque de descarga e, o outro, para a balança que fará a medição de massa. A balança (lado direito da figura 15) encontra-se sobre um suporte independente do restante da bancada, para que possíveis vibrações no escoamento do fluido não gerem erros na medição de massa.

Na seção 3.1 será descrito o medidor de vazão mássica Coriolis que foi utilizado nos ensaios. Na seção 3.2 será descrita a balança que foi utilizada nos ensaios e seu princípio de funcionamento. Na seção 3.3 será descrita a válvula que foi utilizada nos ensaios. Na seção 3.4 será descrita a bomba utilizada nos ensaios. Na seção 3.5 será descrito o sistema de aquisição empregado nos ensaios.

3.1 Medidor de Vazão Mássica Coriolis

O medidor de vazão mássica Coriolis utilizado, mostrado na figura 16, é um medidor da marca MicroMotion do tipo Mass Flow Meter Micro Motion modelo D6. Este equipamento pode trabalhar com uma vazão mássica máxima de 0,25 kg/min e apresenta uma incerteza de medição de 0,03% do máximo valor de escala da vazão, além de um estabilidade de zero de 0,0001 kg/min.

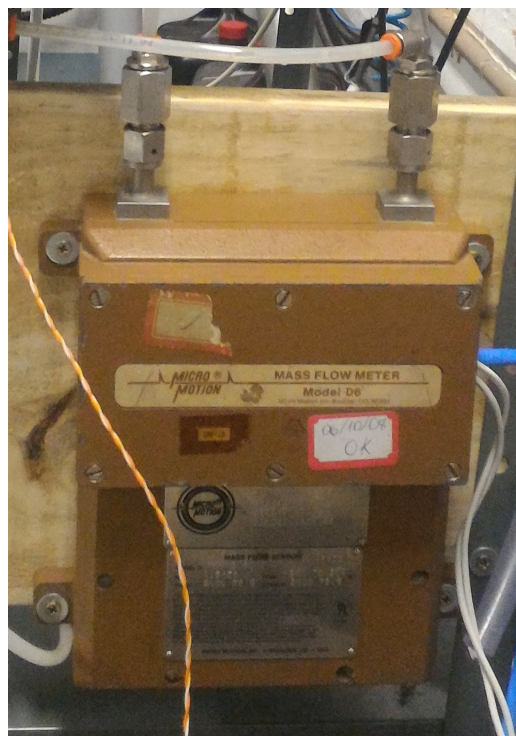


Figura 16 – Medidor de Vazão Mássica Coriolis

A comunicação da medição realizada pelo medidor Coriolis é feita através do REU (*Remote Electronics Unit*). Ele recebe as informações de medição de vazão mássica vindas do medidor Coriolis e envia para a placa de aquisição um sinal de tensão variando de 0 V a 5 V, que é proporcional à vazão mássica medida, sendo 0 V correspondente à vazão 0 kg/min e 5 V correspondente a vazão 0,25 kg/min.

3.2 Balança

A balança é um dos componentes mais importantes utilizados na bancada de ensaios que foi projetada. Isso porque é através da medição de massa de fluido indicada pela mesma que são realizadas as comparações com os valores obtidos no medidor de vazão mássica Coriolis. Dessa forma, a balança utilizada funciona como um padrão para os resultados dos ensaios obtidos com o medidor na bancada.

A balança utilizada é uma balança do tipo eletrônica da marca Shimadzu, mostrada na figura 17. Ela possui como capacidade de carga máxima 6 kg e uma resolução de 0,01 g. Uma balança eletrônica funciona da seguinte forma: sob o prato há um equipamento denominado de célula de carga, que sofre uma compressão quando um corpo é colocado sobre o prato. A célula de carga é um transdutor de força, que capta a intensidade de compressão e transforma essa energia mecânica recebida em uma variação de resistência elétrica. Essa variação de resistência elétrica é medida com auxílio de um circuito de ponte de Wheatstone e o valor condicionado é enviado ao processador da balança [29]. Este tipo de balança é um dos mais utilizados atualmente devido a sua maior sensibilidade e precisão em relação aos outros tipos de balança.

Na bancada, a balança está localizada logo após o medidor de vazão mássica Coriolis, ou seja, na descarga do mesmo. A balança realiza a medição da massa de todo o fluido que atravessa o medidor e envia, por comunicação serial com o PC, esses dados.

3.3 Válvula

A válvula utilizada na bancada é mostrada na figura 18.

Essa válvula é uma válvula com acionamento solenóide de 3/2 vias, ou seja, apresenta três conexões sendo duas de saída. O esquema interno dela é mostrado na figura 19. Nesse esquema é possível ver as conexões 1, 2 e 3, sendo que a conexão 2 corresponde à entrada da válvula e as conexões 1 e 3 correspondem às saídas da válvula. A conexão padrão é o caminho da entrada 2 para a saída 1. Esse caminho é alterado quando a bobina do tipo solenóide que faz o controle da válvula é energizada, dessa forma a saída 1 é fechada e a saída 3 é aberta, passando o caminho de circulação de fluido da entrada 2 para a saída

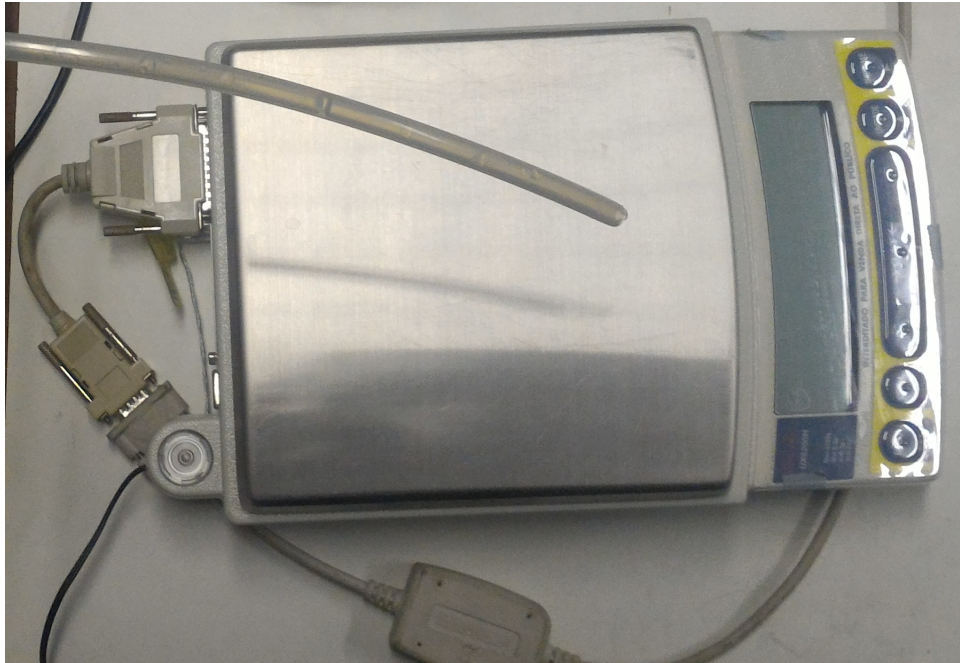


Figura 17 – Balança

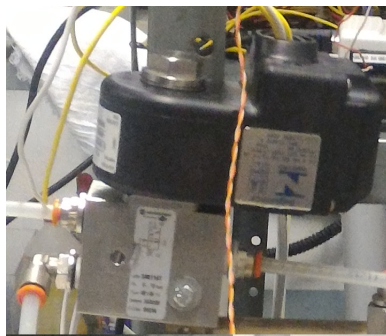


Figura 18 – Válvula

3. Quando a bobina solenóide é desenergizada o caminho do fluido volta para a conexão padrão.

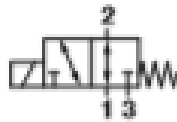


Figura 19 – Esquema Interno da Válvula

3.4 Bomba de Alimentação

A bomba de alimentação utilizada na bancada de ensaios é mostrada na figura 20. Esta bomba é do tipo centrífuga magnética.



Figura 20 – Bomba de Alimentação

Esse tipo de bomba utiliza transmissão por energia magnética, ou seja, não existe eixo de interligação entre a bomba e o motor, já que a transmissão se dá através de dois ímãs, um externo preso ao motor e outro interno. O magneto interno é fixado a um rotor centrífugo, e este conjunto gira, impulsionando o fluido para a saída da bomba. Estas bombas não podem trabalhar a seco, ou seja, sem fluido em seu interior, bem como não podem trabalhar aspirando fluido, por isso é necessário sua instalação abaixo do tanque de descarga, como mostrado na figura 15.

A bomba utilizada possui como vazão máxima de fluido 26,3 L, sendo que na posição onde a mesma está instalada a vazão de fluido é de, aproximadamente, 23 L. A bomba apresenta ainda uma potência de 1/20 HP (37,28 W).

3.5 Placa de Aquisição NI USB-6009

A placa de aquisição utilizada na bancada de ensaios foi a placa NI USB-6009, mostrada na figura 21.

A placa NI USB-6009 oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações simples de *data logging*, medições portáteis e experimentos de laboratórios acadêmicos. Esse dispositivo é acessível aos estudantes, mas suficientemente poderoso para aplicações de medição mais sofisticadas.

A placa de aquisição de dados NI USB-6009 possui 8 entradas analógicas de 14 bits cada uma, sendo duas dessas entradas analógicas utilizadas para a leitura de forma diferencial da tensão enviada pelo medidor Coriolis, correspondente à vazão mássica que o atravessa.

A placa conta ainda com 12 portas de entrada/saída digitais. A saída digital ‘*port0*’ é utilizada para controlar o relé 2 *Relay Module*.

O módulo de relés 2 *Relay Module*, mostrado na figura 22, é empregado para fazer o controle do conjunto entrada-saída que será utilizado em cada momento do ensaio. Esse relé possui a tecnologia de optoacoplador, ou seja, a ligação interna que permite que haja circulação de corrente pelo mesmo não apresenta ligação física, pois quando é alimentado

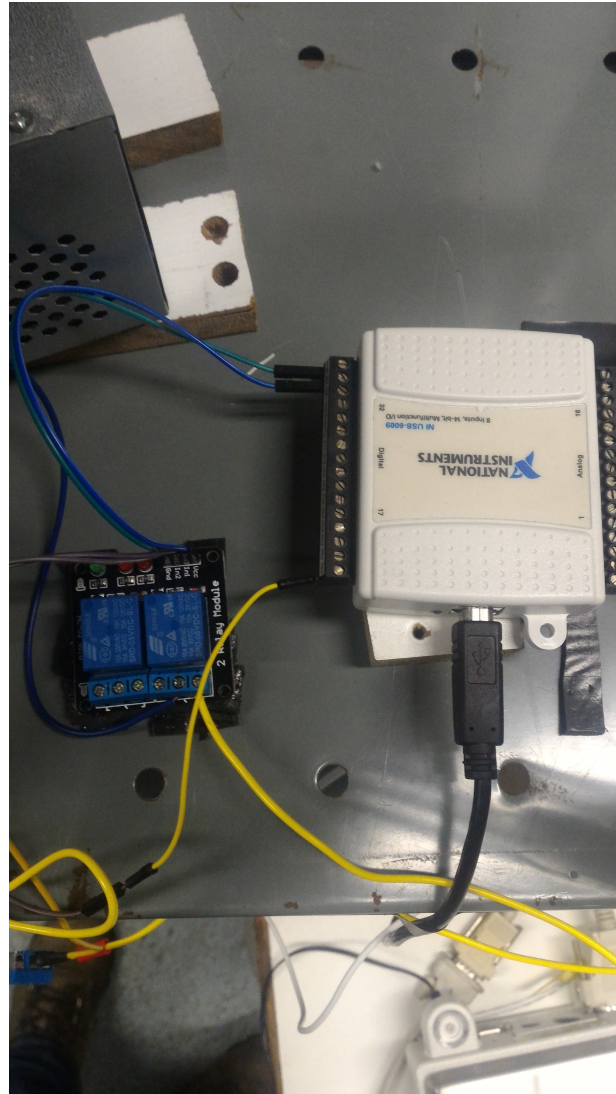


Figura 21 – Placa de Aquisição NI USB-6009

com 5 V e sua entrada de controle correspondente recebe o sinal de controle correto, um LED interno é energizado emitindo luminosidade, sendo essa luminosidade captada por um fotossensor que fecha o circuito e permite a circulação de corrente. Essa característica de não haver contato físico entre a entrada e a saída do módulo de relé é importante, pois serve como proteção para o sistema de aquisição, servindo como barreira entre os sinais de potência e os sinais do sistema de aquisição de dados. O módulo de relés é alimentado com 5V através da saída digital da placa USB-6009, que fornece alimentação 5 V com capacidade de até 8,5 mA de corrente.

O relé *2 Relay Module* pode trabalhar de duas formas, normalmente fechado e normalmente aberto. No modo normalmente fechado, o relé conduz corrente quando a entrada de controle está energizada. Já no modo normalmente aberto, o relé não conduz corrente quando a entrada de controle está energizada. O relé utilizado na bancada está no modo normalmente fechado.

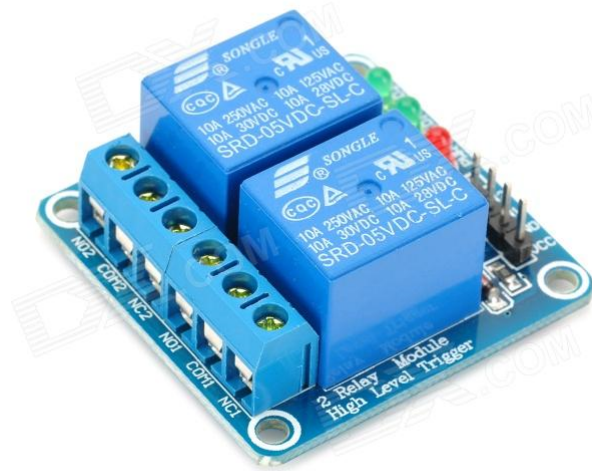


Figura 22 – Relé 2 Relay Module

Na figura 23 é mostrada o esquema de comunicação utilizado entre a placa de aquisição USB-6009, o REU (transmissor do medidor Coriolis) e o relé 2 Relay Module.

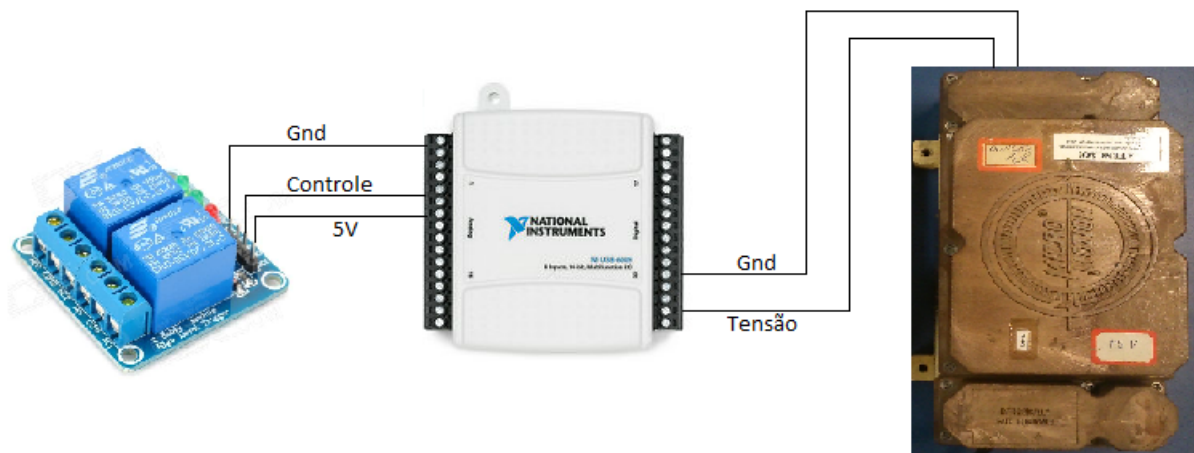


Figura 23 – Esquema de Comunicação com a Placa de Aquisição NI USB-6009

4 Software Desenvolvido

Neste capítulo será explicado e detalhado o código fonte desenvolvido para a criação do sistema supervisorio que foi aplicado para realizar os ensaios na bancada de ensaios. O *software* supervisorio está disposto em uma estrutura com cinco partes, que serão descritas cada qual em uma seção neste capítulo: inicialização do *software*, aquisição de dados, refinamento dos dados, cálculos dos resultados dos ensaios e criação dos arquivos de dados. Além das seções que explicarão as cinco partes do *software*, haverá mais duas seções, uma para explicar a estrutura geral do mesmo e uma para explicar a interface com o usuário.

4.1 Estrutura Geral do *Software*

O *software* desenvolvido com o objetivo de ser o programa supervisorio e para a aquisição e processamento dos dados dos ensaios foi organizado em uma estrutura sequencial das cinco etapas, que serão explicadas em detalhes nas seções 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, de forma que cada etapa aconteça no seu momento correto, apresentando um sequenciamento lógico e, assim, evitando erros na execução do programa por falta ou erros nos dados do ensaio.

Para que se conseguisse a organização dita acima, foi utilizada uma estrutura do ambiente de desenvolvimento LabVIEW chamada *Flat Sequence*, que consiste em um ou mais subdiagramas, ou quadros, que são executados sequencialmente, o que garante que um subdiagrama seja executado antes ou após o outro subdiagrama. Dessa forma, um subdiagrama somente é executado quando aquilo que deveria ocorrer no subdiagrama anterior já ocorreu e que as variáveis conectadas na borda daquele estão todas disponíveis. A estrutura *Flat Sequence* é representada graficamente em LabVIEW como mostra a figura 24 abaixo.

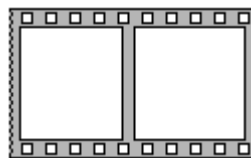


Figura 24 – Representação gráfica da estrutura *Flat Sequence* em LabVIEW

Para que o programa desenvolvido apresente uma estrutura de repetição sem que seja necessário reiniciar o *software* a cada novo ensaio, foi utilizado uma estrutura de *loop* do ambiente de desenvolvimento LabVIEW chamada *While* que consiste em uma estrutura que executa o código nele contido até que uma determinada condição ocorra.

As demais estruturas, métodos e classes que foram utilizados no desenvolvimento de *software* serão expostas e explicadas no decorrer das seções seguintes de explicação do código, conforme forem surgindo e for necessário para a compreensão do mesmo. Na figura 25 é mostrado como está estruturado, de forma simplificada, ou seja, sem o código, o *software* utilizado na bancada de ensaios.

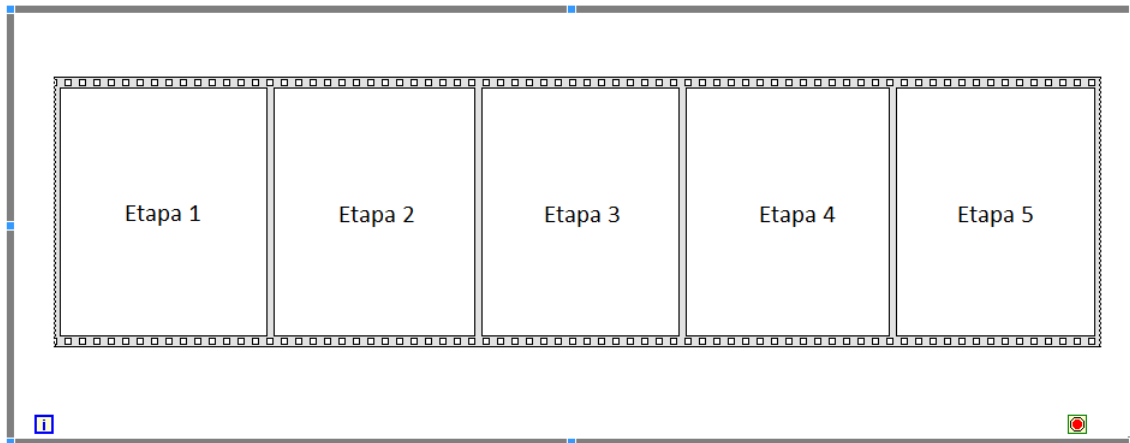


Figura 25 – Estrutura básica do *software* desenvolvido

4.2 Interface com Usuário

A interface com usuário é mostrada na figura 26, sendo através dela que usuário interage com o *software*. A interface está dividida em quatro partes, sendo a primeira correspondente à inicialização do programa, a segunda corresponde às informações da aquisição e resultados, a terceira parte corresponde as informações das variáveis de controle e de observação e a quarta parte corresponde aos gráficos dos ensaios.

A primeira rotina que acontece logo que se inicia o *software* diz respeito a uma mensagem que aparece na tela para lembrar o usuário que é necessário zerar a balança antes de iniciar o próximo ensaio. Essa mensagem é mostrada na figura 27.

Na primeira parte, mostrada detalhadamente na figura 28, estão os botões de controle por parte do usuário para a inicialização do ensaio. Primeiro deve ser escolhida a porta de comunicação através da qual a balança está conectada ao computador. Após isso, deve ser escolhida a massa de fluido máxima do ensaio, que será escrita na variável ‘Massa Máxima’ que é utilizada na etapa de aquisição de dados da balança, descrita na seção 4.4.2. Ainda nesta parte estão os botões correspondentes a cada equipamento, sendo eles a bomba, o sistema de aquisição, a balança e o medidor de vazão mássica Coriolis e seus respectivos LEDs. Estão presentes também nessa parte os botões ‘Bolhas’, que indica que deve ser feita a circulação de fluido no caminho tanque reservatório → tanque de descarga por 15 minutos, ‘Tem Bolhas’, que indica que deve ser feita novamente a circulação de

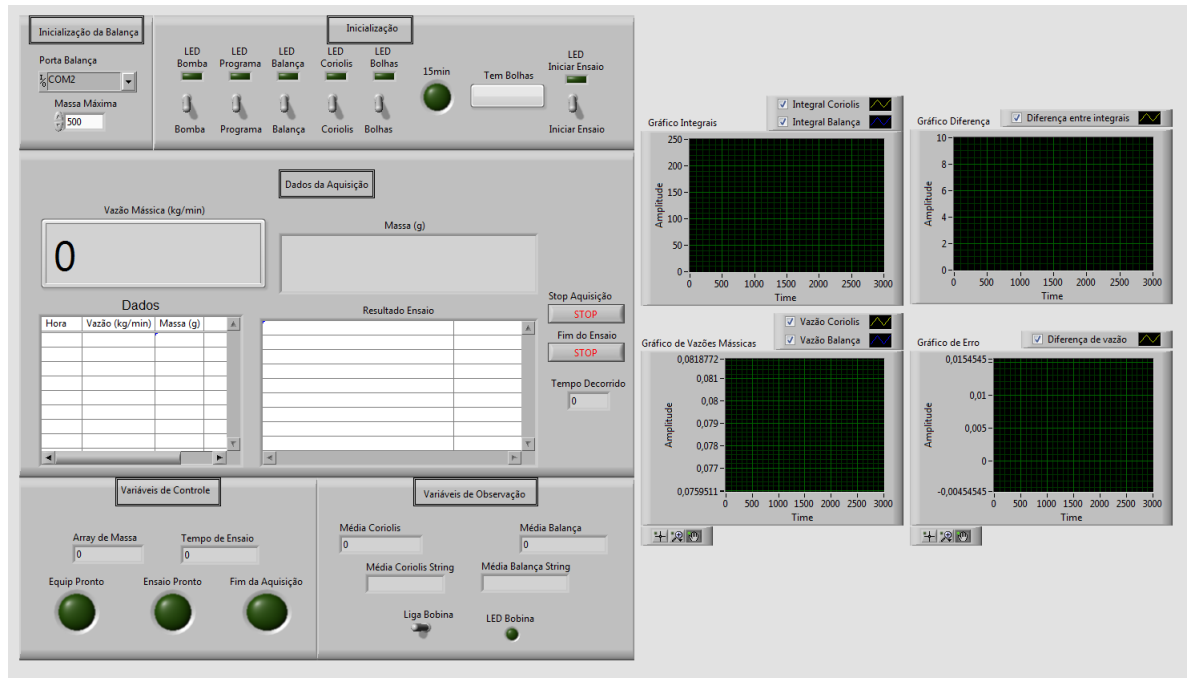


Figura 26 – Interface com Usuário

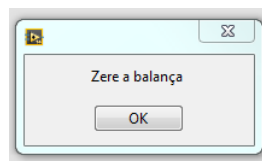


Figura 27 – Mensagem na Interface com Usuário

fluido no caminho tanque reservatório → tanque de descarga por 15 minutos, e 'Iniciar Ensaio' com seu respectivo LED, que indica que a aquisição pode ser iniciada, além do LED '15min' que indica que os 15 minutos de circulação de fluido no caminho tanque reservatório → tanque de descarga por 15 minutos foram atingidos.



Figura 28 – Inicialização na Interface com Usuário

Na segunda parte, mostrada detalhadamente na figura 29, estão as informações vindas da etapa do *software* que faz a aquisição de dados. Nela são mostrados os dados de vazões mássicas instantâneas obtidas através do medidor de vazão mássica Coriolis e massa de fluido acumulada a cada segundo sobre a balança. Além disso, são mostrados os dados, instantaneamente, que compõem o vetor 'Dados' e, também, os botões 'Stop

Aquisição’, que encerra a aquisição, e ‘Fim do Ensaio’, que finaliza o *software*. Toda essa interface gerada no código descrito na seção 4.4. Há uma tabela que mostra, após o fim de cada ensaio, os resultados obtidos com o mesmo, sendo essa parte da interface gerada através do código descrito na seção 4.6.

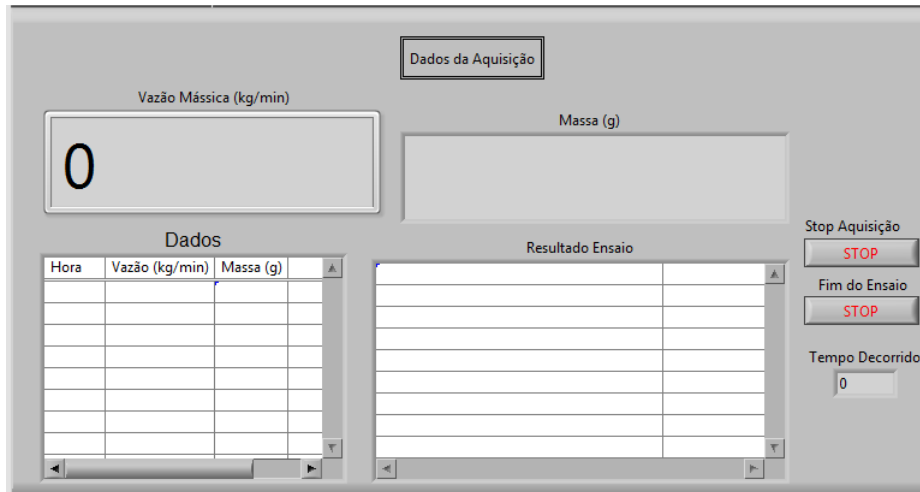


Figura 29 – Aquisição na Interface com Usuário

Na terceira parte, mostrada detalhadamente na figura 30, estão as variáveis de controle e de observação que são utilizadas e geradas em diversas etapas do código.



Figura 30 – Variáveis na Interface com Usuário

Na quarta parte, mostrada detalhadamente na figura 31, são apresentados os gráficos gerados na terceira etapa do *software*, descrita na seção 4.5. Os gráficos têm a função de mostrar como as vazões mássicas obtidas através da balança e do medidor de vazão Coriolis se comportam no decorrer de cada ensaio, além de comparar os resultados obtidos com cada um dos dois equipamentos, sendo que cada um deles mostra uma relação específica entre as vazões mássicas. O gráfico ‘Gráfico Integrais’ faz a comparação das integrais das vazões mássicas da balança e do medidor Coriolis. O gráfico ‘Gráfico Diferença’ mostra a subtração entre as integrais de vazão mássica. O gráfico ‘Gráfico de Vazões Mássicas’ faz a comparação entre os valores de vazão mássica obtidos através da balança e do medidor Coriolis a cada instante de tempo. O gráfico ‘Gráfico de Erro’ mostra o erro existente a cada momento entre as vazões mássicas medidas pela balança e pelo medidor Coriolis.

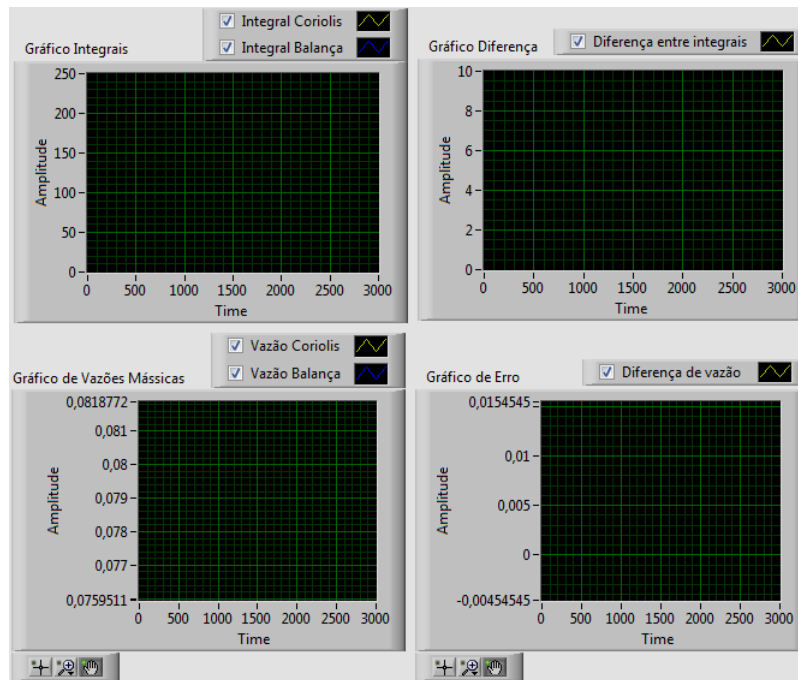


Figura 31 – Gráficos da Interface com Usuário

4.3 Inicialização do Software

A primeira etapa que deve ser aplicada no ensaio e, conseqüentemente, no *software* é a inicialização do processo como um todo. Essa inicialização ocorre através de uma sequência de fatos e tomadas de decisão que devem ocorrer para que o programa desenvolvido e o ensaio de maneira geral ocorra do modo desejado, e que os dados obtidos sejam corretos. O fluxograma dessa etapa do código é apresentado na figura 32.

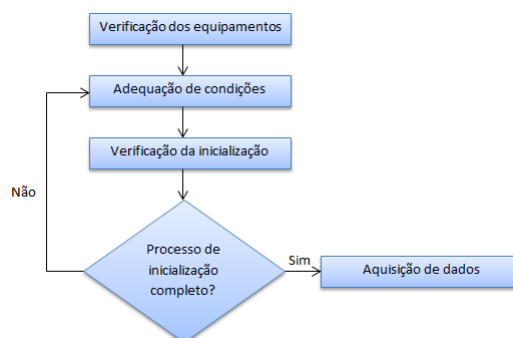


Figura 32 – Fluxograma da Etapa de Inicialização do Software

O subdiagrama que corresponde à etapa de inicialização do processo é mostrado na figura 33, que corresponde ao primeiro dos cinco quadros da estrutura *Flat Sequence* que compõe o todo *software*. Nesta figura é possível observar que a etapa de inicialização do processo se divide em três partes, uma de verificação dos equipamentos utilizados na bancada de ensaios, uma de adequação de condições e outra de verificação da inicialização.

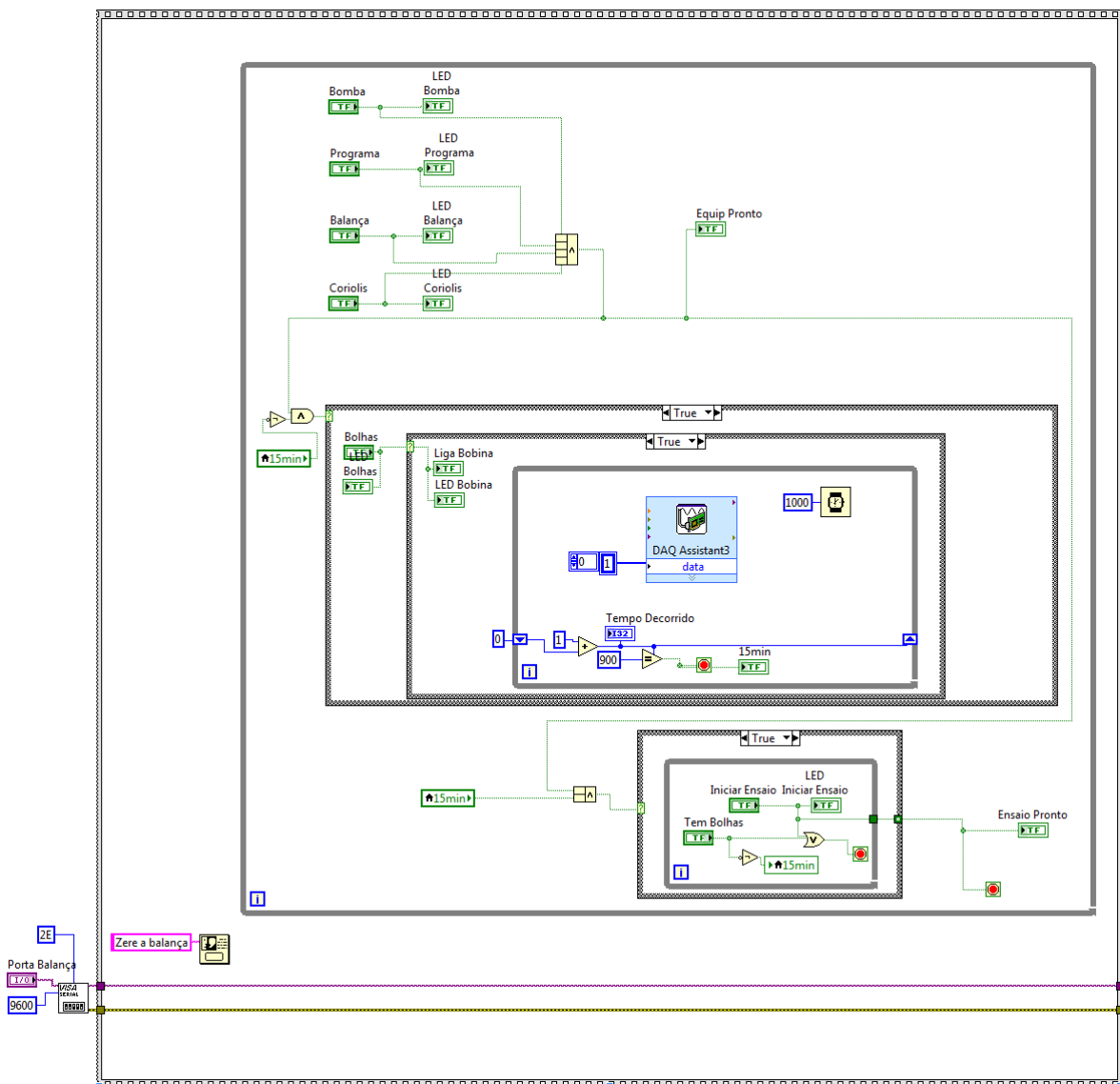


Figura 33 – Código para Inicialização do Processo

4.3.1 Verificação dos Equipamentos

Na figura 34 é mostrado o fluxograma da primeira parte da inicialização do processo e na figura 35 é mostrado o código dessa primeira parte da inicialização do processo, que consiste na verificação dos equipamentos presentes na bancada de ensaios. É indispensável que todos estejam trabalhando da maneira correta para o funcionamento da bancada de ensaios.

A verificação dos equipamentos é feita a partir de botões e LEDs presentes na interface, que mostram o estado dos equipamentos da bancada de ensaios. A primeira rotina do programa dispara uma mensagem na tela do supervisor com uma mensagem alertando para que o usuário lembre-se de zerar a balança. Além disso, nesse momento do programa também é aberta a comunicação serial com a balança, comunicação essa que será

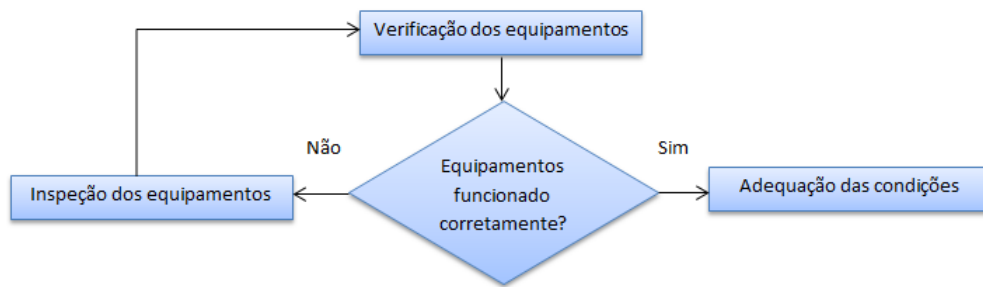


Figura 34 – Fluxograma para Verificação dos Equipamentos

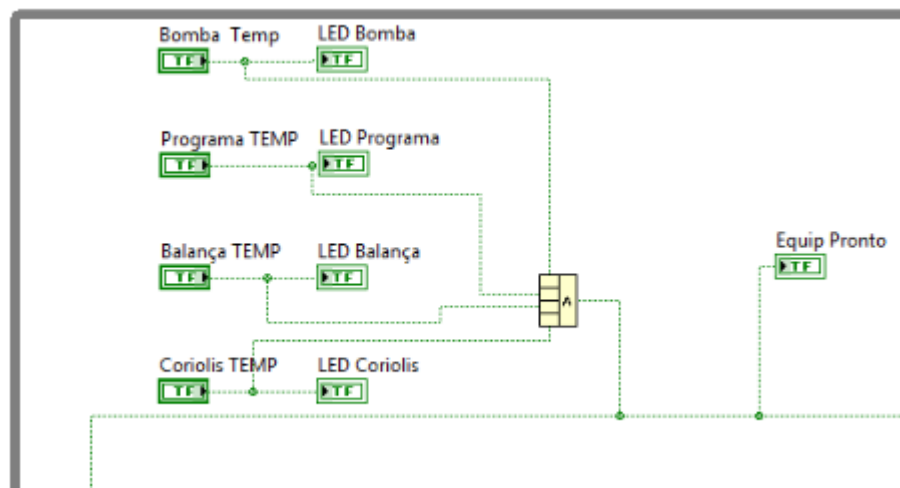


Figura 35 – Código para Verificação dos Equipamentos

utilizada na segunda parte do *software*. Após essa mensagem ser confirmada, a verificação começa e é feita por inspeção do próprio usuário do programa, que deve checar se todos os equipamentos estão ligados, conectados e inicializados da maneira correta para o início do ensaio. Uma vez que essa checagem termina e que os equipamentos estão em perfeito funcionamento, o usuário deve alterar o botão correspondente de cada equipamento, sendo eles a bomba, o sistema de aquisição, a balança e o medidor de vazão mássica Coriolis. Quando cada um dos botões correspondentes aos equipamentos são acionados, os LEDs ligados a cada um deles indicam os estados dos mesmos.

As informações sobre os equipamentos que assumem valores '0' ou '1', onde '0' indica que o equipamento não está pronto para uso e '1' indica que o equipamento está pronto para uso, são então comparadas através da operação booleana *AND*. O resultado dessa operação booleana é passada para um outro comparador booleano *AND*, que terá sua função explicada na seção 4.3.2, e tem seu estado mostrado através do LED 'Equip Pronto'.

4.3.2 Adequação de Condições

Na figura 36 é mostrado o fluxograma para a segunda parte da inicialização do *software* e na figura 37 é mostrado código da segunda parte da inicialização do *software*, que consiste na adequação das condições da bancada para a realização do ensaio.

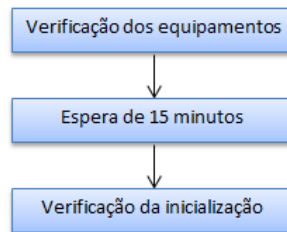


Figura 36 – Fluxograma para Adequação de Condições

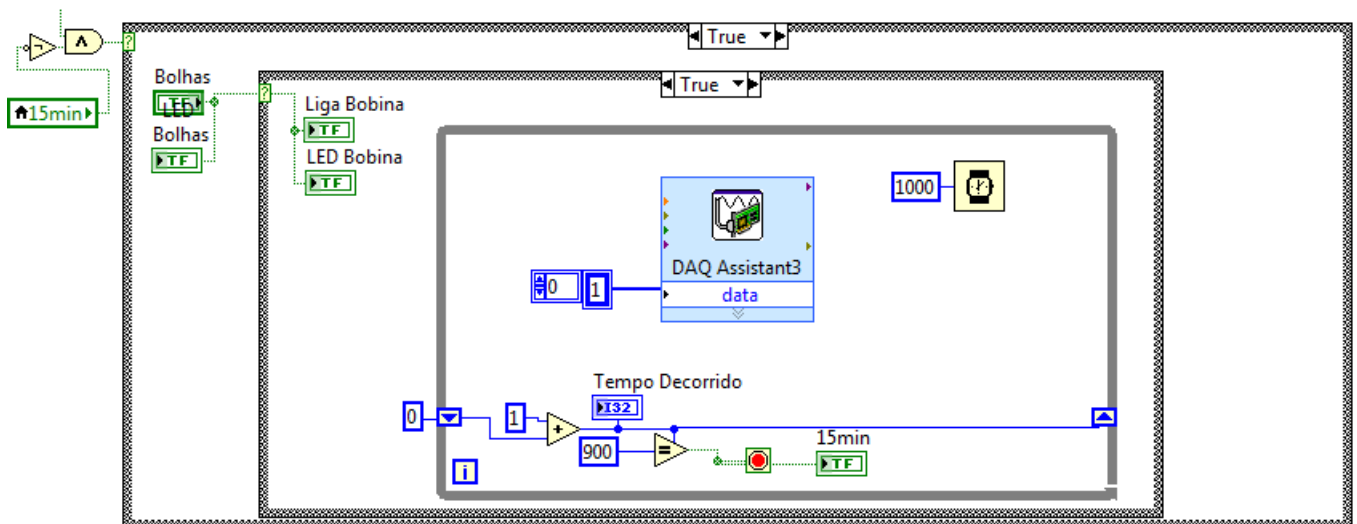


Figura 37 – Código para Adequação de Condições

A etapa de adequação das condições para o ensaio é composta de duas estruturas *Case Structure*, do LabVIEW, em cascata, sendo que na estrutura *Case Structure* interna existe também uma estrutura *While*. A *Case Structure* consiste em uma estrutura composta de dois ou mais subdiagramas, onde cada um é mostrado na tela por vez, e a estrutura executa apenas um caso por vez, sendo que um valor de entrada seleciona o subdiagrama a ser executado.

A estrutura *Case Structure* externa apresenta como seletor o resultado da operação booleana entre duas variáveis para o operador *AND*. A operação booleana desse operador *AND* é realizada entre o resultado do operador *AND* descrito na seção 4.3.1 e o estado negado, através do operador booleano *NOT*, da variável '15min'. Caso o resultado obtido no operador *AND* seja '1', o caso *TRUE* da estrutura *Case Structure* é executado. Caso o resultado obtido no operador *AND* seja '0', o caso *FALSE* da estrutura *Case Structure* é executado.

Se o caso *FALSE* da estrutura *Case Structure* externa for selecionado para execução através do resultado de valor ‘0’ no operador *AND*, nada ocorre e o programa aguarda até que haja alguma mudança nas variáveis de controle desta estrutura. Já se o caso *TRUE* da estrutura *Case Structure* externa for selecionado para execução através do resultado de valor ‘1’ no operador *AND*, a estrutura *Case Structure* interna é então passível de realizar a escolha de seu caso de execução.

Para a estrutura *Case Structure* interna, a seleção do caso a ser executado depende do estado da variável de controle ‘Bolhas’. Esta variável indica que a tubulação ou outro elemento da bancada por onde o fluido escoar apresenta bolhas e estas devem ser eliminadas para o prosseguimento do ensaio. A variável ‘Bolhas’, que está ligada ao LED correspondente, tem seu estado alterado de acordo com a inspeção do usuário, que é alterado pela ação do usuário sobre o botão correspondente na interface com o usuário mostrada na figura 28 da seção 4.2. Essa variável tem como estado padrão o valor ‘0’ (*FALSE*). Se o estado da variável ‘Bolhas’ for ‘0’, o caso *FALSE* da estrutura *Case Structure* interna é selecionado, sendo que nesse caso o programa entra em uma estrutura *While* cuja única ação que ocorre é a espera até que a variável ‘Bolhas’ mude para o estado de valor ‘1’ (*TRUE*). Se o estado da variável ‘Bolhas’ for ‘1’, o caso *TRUE* da estrutura *Case Structure* interna é selecionado, sendo que nesse caso o programa entra em uma estrutura *While* cuja função é manter o fluxo de fluido escoando do tanque reservatório para o tanque de descarga, passando somente através do medidor de vazão mássica Coriolis, o que deve ser feito para que se eliminem possíveis bolhas que possam estar nesse trajeto do fluido. A escolha do trajeto é feita através da escrita do valor binário ‘1’ na porta digital ‘port0’ da placa de aquisição USB-6009. Isso é feito através da ‘VI DAQ Assistant3’ mostrada na figura 37. Além da escolha do caminho que o fluido deve seguir, nesta estrutura *While* é disparado um contador de tempo, que faz a contagem de tempo de 15 minutos (900 segundos), que é o tempo indicado como necessário de circulação de fluido através do medidor de vazão Coriolis para a eliminação de possíveis bolhas, segundo o manual do fabricante. Após a contagem dos 15 minutos, é ativada a condição de parada da estrutura *While* e a variável ‘15min’ muda para o estado de valor ‘1’ (*TRUE*).

4.3.3 Verificação da Inicialização

Na figura 38 é mostrado o fluxograma da terceira parte da inicialização do *software* e na figura 39 é mostrado o código dessa terceira parte da inicialização do *software*, que consiste na verificação da inicialização da bancada para a realização do ensaio. Essa subparte nada mais é do que uma verificação final de tudo que foi realizado nesta primeira parte de inicialização do *software*, a fim de averiguar se tudo ocorreu corretamente e prosseguir com o ensaio, autorizando a passagem para a parte de *software* que faz a aquisição dos dados, que diz respeito à segunda parte.

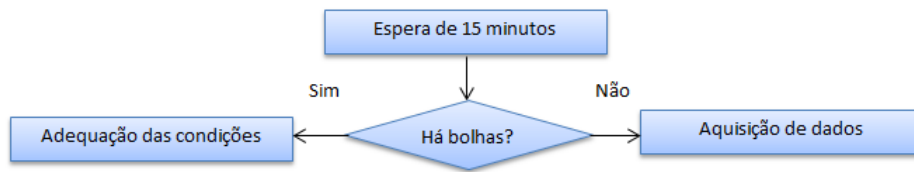


Figura 38 – Fluxograma para Verificação da Inicialização

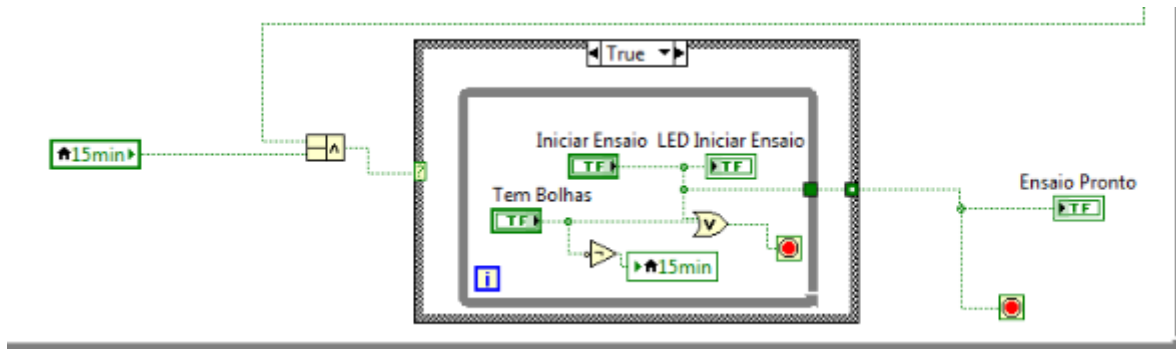


Figura 39 – Código para Verificação da Inicialização

A parte de verificação da inicialização é composta por uma estrutura *Case Structure*, com uma estrutura *While* interna ao subdiagrama *TRUE*. A seleção de qual dos casos será executado é feita através do operador booleano *AND* de duas variáveis na entrada do seletor. As variáveis que estão na entrada do operador booleano *AND* são o resultado do operador booleano *AND* de quatro variáveis, descrito na seção 4.3.1, e o estado da variável ‘15min’, descrito na seção 4.3.2.

Se o caso *FALSE* da estrutura *Case Structure* for selecionado para execução através do resultado de valor ‘0’ no operador *AND*, nada ocorre e o programa aguarda até que haja alguma mudança nas variáveis de controle desta estrutura. Já se o caso *TRUE* da estrutura *Case Structure* for selecionado para execução através do resultado de valor ‘1’ no operador *AND*, a estrutura *While* interna é então iniciada.

Dentro da estrutura *While*, como pode ser observado na figura 39, existe um operador booleano *OR*, que faz a tomada de decisão da estrutura, sendo esse conectado à condição de parada da estrutura em questão.

As variáveis que estão na entrada do operador booleano *OR* são ‘Iniciar Ensaio’ e ‘Tem Bolhas’, e são controladas através da ação do usuário na interface do usuário, mostradas na figura 28 na seção 4.2. As funções dessas duas variáveis são bastante distintas. A variável ‘Tem Bolhas’ é acionada pelo usuário caso o mesmo, após decorrido o tempo de 15 minutos, observe que ainda há bolhas de ar na tubulação por onde escoar o fluido. Caso essa variável seja acionada, ela fará com que a estrutura *While* seja finalizada e, através do operador booleano *NOT*, mude o estado da variável ‘15min’ para *FALSE*, interrompendo a etapa de verificação da inicialização e voltando para a etapa de adequação das condições.

Já a variável ‘Iniciar Ensaio’, quando acionada pelo usuário, indica que a primeira parte do *software* foi concluída com sucesso e que a segunda parte do *software*, correspondente à aquisição de dados, pode ser iniciada. Dessa forma, a variável ‘Iniciar Ensaio’, quando acionada, encerra a parte de verificação da inicialização, bem como a etapa de inicialização do *software*.

4.4 Aquisição de Dados

A segunda etapa do *software* consiste na etapa de aquisição de dados, mostrada na figura 40, que está organizada através da estrutura *Flat Sequence*, juntamente com estruturas *While* e *Case Structure* internamente.

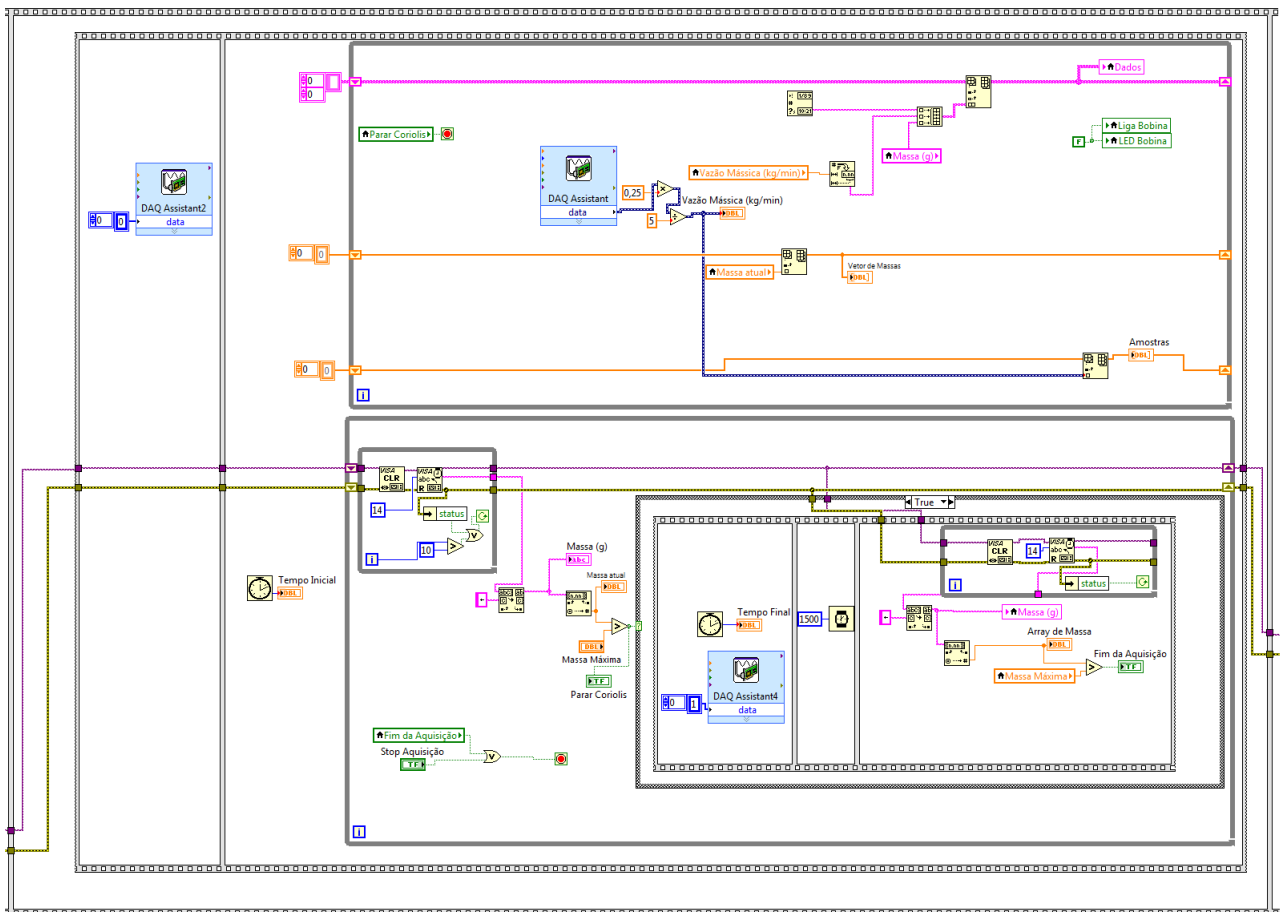


Figura 40 – Código para Aquisição de Dados

A estrutura *Flat Sequence* foi organizada em uma sequência de dois quadros. O primeiro quadro da sequência possui uma função bastante simples no *software*, que consiste em escrever na porta ‘port0’ o valor binário ‘0’. Esse valor binário faz com que o relé, descrito na seção 3.5, atue sobre a válvula, descrita na seção 3.3, mudando o caminho pelo qual o fluido escoava através da bancada, para a balança. O segundo quadro da sequência diz respeito à aquisição propriamente dita, e está disposto em duas estruturas *While*, uma

para aquisição dos dados do medidor de vazão mássica Coriolis e a outra para a aquisição dos dados da balança. Ambas as aquisições realizadas nesse segundo quadro são executadas de forma paralela.

4.4.1 Aquisição de Dados do Medidor de Vazão Mássica Coriolis

A parte do *software* que realiza a aquisição dos dados do medidor de vazão mássica Coriolis tem como fluxograma a figura 41, e seu código é mostrado detalhadamente na figura 42.

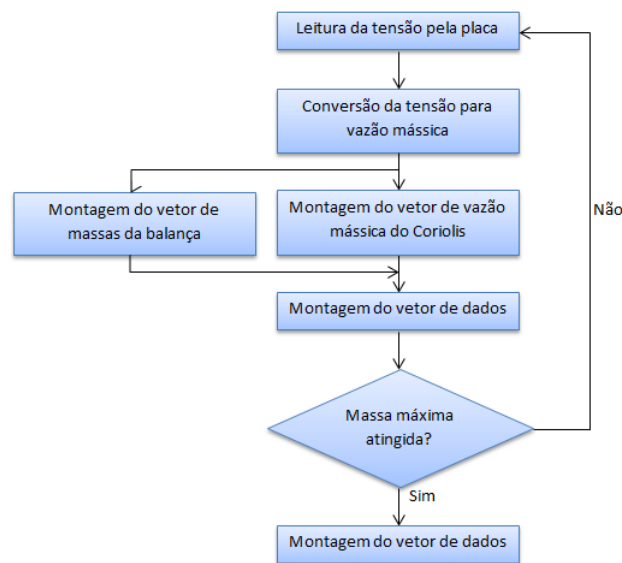


Figura 41 – Fluxograma para Aquisição de Dados do Medidor Coriolis

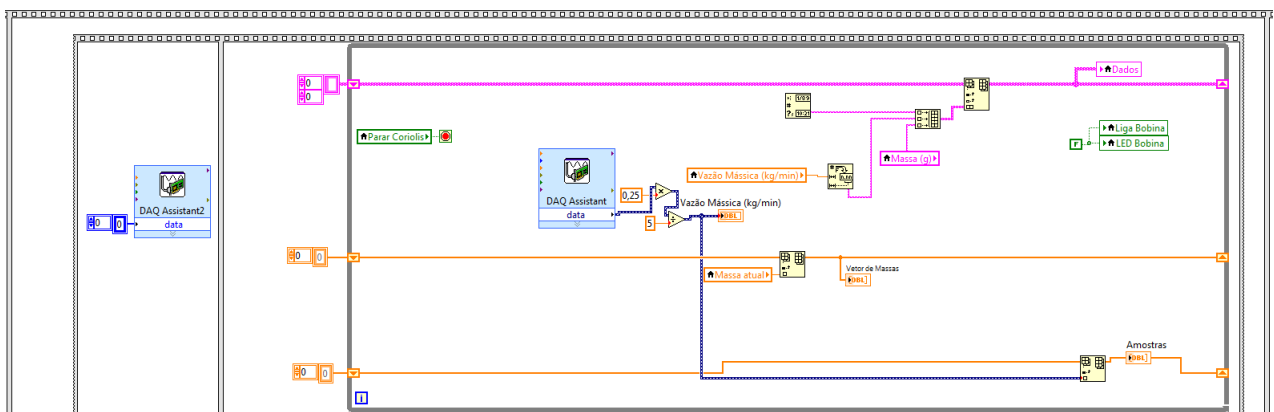


Figura 42 – Código para Aquisição de Dados do Medidor Coriolis

A aquisição dos dados do medidor de vazão mássica Coriolis é feita através de uma estrutura *While*. Nessa estrutura, primeiramente, através da *VI DAQ Assistant* é feita a leitura das portas analógicas de entrada 'A10' e 'A14'. Essa leitura é feita de maneira diferencial, a cada 100 ms, ou seja, 10 amostras por segundo, e capta a tensão aplicada nas

portas analógicas de entrada, sendo que a porta ‘*AIO*’ está conectada ao pino do medidor Coriolis que envia a tensão proporcional à vazão medida pelo mesmo e a porta ‘*AI4*’ está conectada ao pino de referência de medição do medidor Coriolis. A leitura das portas ‘*AIO*’ e ‘*AI4*’ deve ser feita de maneira diferencial, pois a placa de aquisição, descrita na seção 3.5, empregada na bancada de ensaios possui entre suas entradas analógicas esse método de leitura.

O valor em tensão obtido pela medição diferencial é então processado, de maneira a ser convertido em vazão mássica. Essa conversão é feita através de duas operações sobre o dado da medição. A primeira é uma operação de multiplicação por uma constante no valor de 0,25, que corresponde à vazão mássica máxima que pode ser medida pelo medidor de vazão mássica Coriolis. A segunda operação é uma divisão do valor obtido na operação anterior por 5, que corresponde à máxima tensão enviada pelo medidor Coriolis para a entrada analógica da placa de aquisição USB 6009. O valor obtido após essa segunda operação corresponde à vazão mássica que passa através do medidor Coriolis e é depositada e medida pela balança, sendo armazenada na variável ‘Vazão Mássica’. Com o valores dessa variável é montado o vetor que contém todas as medidas de vazão mássica de um ensaio, sendo que esse vetor é armazenado na variável ‘Amostras’.

Na estrutura *While* também é montado outro vetor, que é composto pelas informações de horário em que foi realizado o ensaio, pela vazão mássica e pela massa obtida pela balança, que será explicada na seção 4.4.2. O vetor montado é armazenado na variável ‘Dados’, que é utilizada em outras partes do código, na terceira etapa do *software*, descrita na seção 4.5, e na quinta etapa do *software*, descrita na seção 4.7.

Além do vetor descrito acima, também é montado um outro vetor, que é composto pelos valores de massa medidos pela balança, que será explicada na seção 4.4.2. O vetor montado é armazenado na variável ‘Vetor de Massas’, que é utilizada em outras partes do código, na terceira etapa do *software*, descrita na seção 4.5, para a construção dos gráficos mostrados na interface do usuário, da seção 4.2.

A aquisição de dados do medidor de vazão mássica Coriolis é encerrada quando o comando de parada para a estrutura *While* é disparado. Esse comando é o estado da variável ‘Parar Coriolis’, que é alterado de acordo com uma operação matemática de comparação feita na aquisição de dados da balança, que será explicada na seção 4.4.2 a seguir.

4.4.2 Aquisição de Dados da Balança

A parte do *software* que realiza a aquisição dos dados da balança tem como fluxograma a figura 43, e seu código é mostrado mais detalhadamente na figura 44.

A primeira ação tomada nesta parte do código é iniciar um cronômetro, que mede o

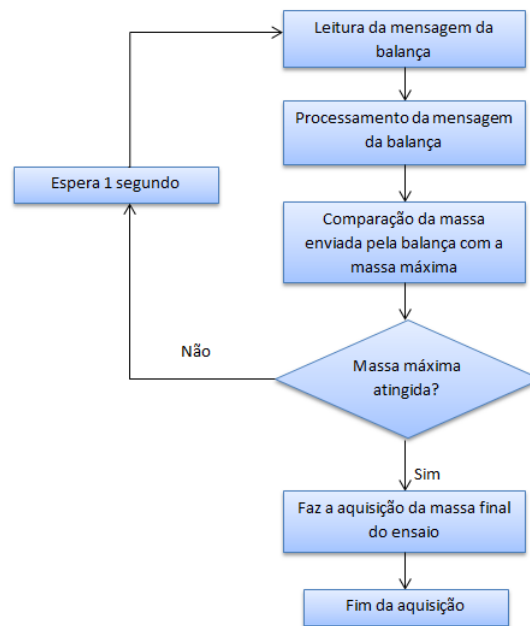


Figura 43 – Fluxograma para Aquisição de Dados da Balança

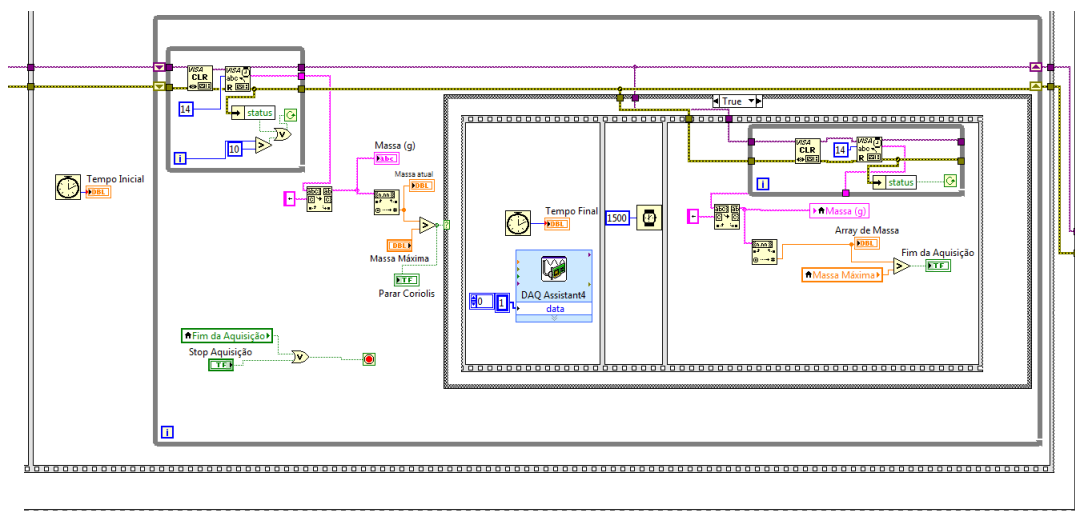


Figura 44 – Código para Aquisição de Dados da Balança

tempo em milissegundos, para que se tenha o tempo inicial do ensaio, sendo essa informação de tempo armazenada na variável ‘Tempo Inicial’, que será utilizada nas próximas etapas do *software*. Essa aquisição de dados da balança é feita através de uma comunicação serial com o computador, que é aberta na primeira etapa do código, seção 4.3. Nela a balança envia a cada 1 segundo os dados referentes à medição de massa naquele instante. Isso é feito através da primeira estrutura interna ao laço *While*, mostrada na figura 45. A aquisição dos dados da balança é realizada através da estrutura *While* presente na figura 44, onde, primeiramente, o *buffer* de entrada de dados é limpo através da função *VISA Clear Function*, que apaga tudo que está na entrada e na saída dos *buffers* do dispositivo. Após isso, a comunicação segue para a leitura da comunicação serial através da função

VISA Read Function. A estrutura *While* que faz esta leitura não apresenta uma condição de parada, mas sim uma condição de repetição, que é a não existência de erro, verificada através da função *Unbundle By Name Function* conectada à saída de erro da função *VISA Read Function*, ou a tentativa de comunicação dez vezes sem êxito. Os dados enviados pela balança e lidos pela função *VISA Read Function* são do tipo *string* e são enviados para fora da estrutura *While* para serem tratados.

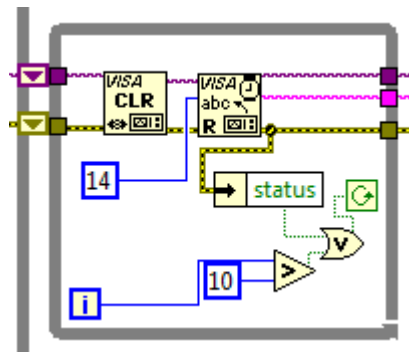


Figura 45 – Código para Comunicação com a Balança

O tratamento dos dados da balança começa por uma quebra da *string* obtida pela função *VISA Read Function*, pois a informação de massa que chega pela *string* possui, juntamente com o valor de massa, caracteres de parada de comunicação, que devem ser retirados, já que aquilo que importa é apenas o valor de massa para a medição. Isto é feito através da função *Match Pattern Function*, sendo o que resulta desta função o valor de massa enviado pela balança em formato *string*. Essa informação é então guardada na variável ‘Massa’, que é utilizada para formar o vetor ‘Dados’, descrito na seção 4.4.1. O valor de massa que sai da função *Match Pattern Function* é então convertido para um valor numérico de formato *double* através da função *Fract/Exp String To Number Function*. Esse valor numérico é então comparado com o valor presente na variável ‘Massa Máxima’ para saber se aquele valor numérico é maior que o presente na variável, indicado pelo usuário, através da interface do usuário, como descrito na seção 4.2. O resultado booleano dessa comparação é utilizado em dois locais no código, tanto para a sequência da rotina de aquisição de dados da balança, quanto na condição de parada para a aquisição de dados do medidor de vazão mássica Coriolis, onde, para isso, o valor booleano é salvo na variável ‘Parar Coriolis’.

O resultado booleano da comparação dita acima é utilizado na rotina de aquisição de dados da balança como seletor de caso para a estrutura *Case Structure*, que faz a parte final da aquisição. Se o resultado da comparação for ‘0’, indica que o ensaio ainda não deve ser interrompido, pois a massa de fluido desejada não foi atingida e, dessa forma, o caso ‘*FALSE*’ é selecionado, sendo que nesse caso nada ocorre e a aquisição dos dados da balança segue normalmente. Já se o resultado da comparação for ‘1’, indica que o ensaio deve ser encerrado, uma vez que a quantidade de massa desejada foi atingida. Assim, o

caso ‘TRUE’ da estrutura *Case Structure* é selecionado. Nele é aplicada uma estrutura *Flat Sequence* de três quadros, mostrada na figura 46.

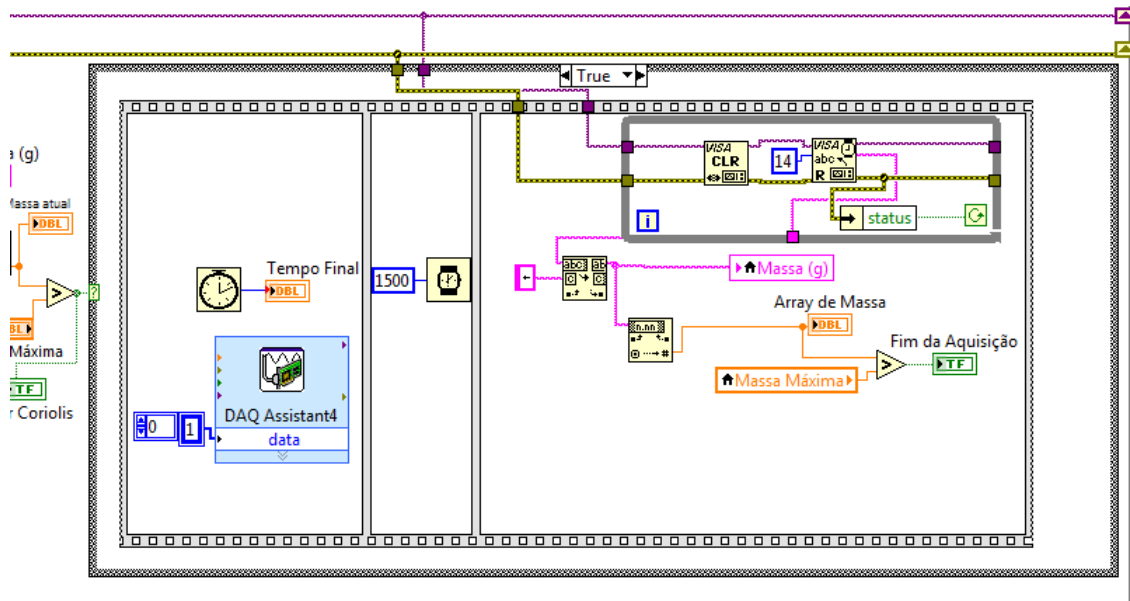


Figura 46 – Código para Aquisição do Último Dado de Massa

No primeiro quadro, ocorre a interrupção do caminho que leva o fluido até a balança, mudando esse caminho para o tanque de descarga. Isso é feito com a escrita do valor binário ‘1’ na porta de saída digital ‘*port0*’ da placa de aquisição, através da *VI DAQ Assistant4*. Nesse primeiro quadro também é obtido, através de um cronômetro, o valor em milisegundos do tempo final do ensaio, que é salvo na variável ‘Tempo Final’, sendo utilizado nas próximas etapas do *software*.

No segundo quadro, é realizada uma pequena pausa de 1,5 segundos através da função *Wait*. Essa pausa é feita para que se possa tomar, no terceiro quadro, a massa final, já que segundo o manual da balança este é o tempo para assentamento da medição de massa feita pela mesma.

No terceiro quadro, é feita novamente a aquisição dos dados da balança assim como foi descrito no início desta seção. Isso é feito para que se tenha o valor final de massa de fluido que foi depositado na balança. Esse valor final é processado da mesma forma como o descrito no início desta seção, e o valor de massa obtido é armazenado na variável ‘Array de Massa’, que será utilizado para a realização dos cálculos de erros na seção 4.6.

4.5 Refinamento de Dados

A terceira etapa do *software*, que realiza o refinamento dos dados é importante para que alguns dados do ensaio sejam adequados para aquilo que foi realizado no mesmo. O

fluxograma dessa etapa é mostrado na figura 47, sendo seu código mostrado detalhadamente na figura 48.

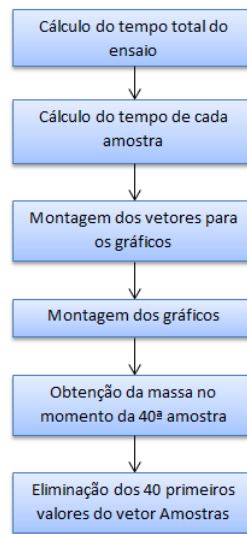


Figura 47 – Fluxograma para Refinamento de Dados

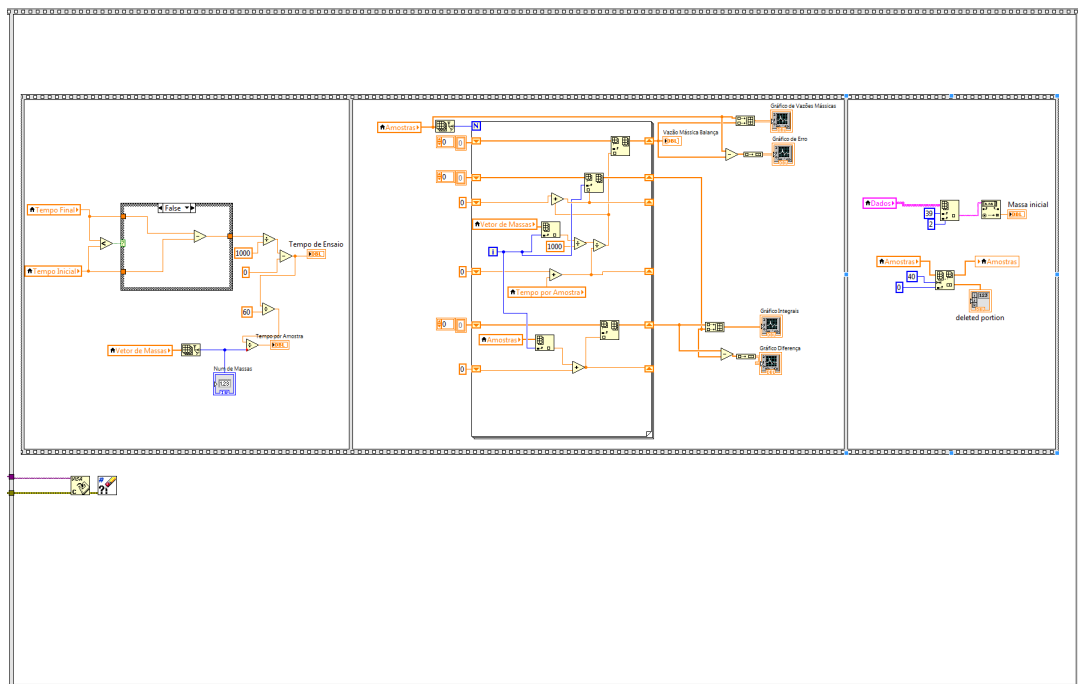


Figura 48 – Código para Refinamento de Dados

Esta etapa do *software* foi organizada através de uma estrutura *Flat Sequence* de três quadros. Além disso, nessa etapa a comunicação serial feita com a balança é encerrada e para isso é utilizada a função *VISA Close Function*.

O primeiro quadro da estrutura *Flat Sequence*, mostrado na figura 49, é utilizado para o cálculo do tempo total do ensaio. Nele é feito primeiro uma comparação entre o

tempo final e o tempo inicial para que um possível problema de *overflow* no valor de tempo não cause erro. Isso pode ocorrer devido ao fato de que o cronômetro utilizado possui um número máximo de tempo que pode ser lido, tempo esse que é acumulativo enquanto o computador está ligado. Então, caso esse valor seja atingido, o cronômetro reinicia sua contagem causando um erro na medida de tempo, e caso ocorra esse fato, o tempo de ensaio é então tratado pela rotina do código mostrada na figura 50. Caso esse erro não ocorra, o tempo do ensaio é então tratado primeiro através de uma subtração das variáveis ‘Tempo Final’ pela ‘Tempo Inicial’, após isso o resultado é dividido por 1000 para se obter o tempo em segundo. Então desse novo resultado são subtraídos 4 segundos, que são correspondentes às 40 amostras eliminadas no primeiro quadro da estrutura *Flat Sequence*, e armazenado na variável ‘Tempo de Ensaio’. Após o valor de tempo do ensaio ser obtido, é possível através dele calcular o tempo por amostras, que será utilizado no segundo quadro. Para isso, primeiro o valor da variável ‘Tempo de Ensaio’ é dividido por 60, para que se tenha o tempo em minutos. O resultado da divisão é então dividido pelo número de amostras presentes no vetor ‘Vetor de Massas’, que é obtido através da função *Array Size* que retorna o tamanho do vetor. O resultado dessa nova divisão é corresponde ao tempo entre amostras sucessivas e é armazenado na variável ‘Tempo por Amostra’.

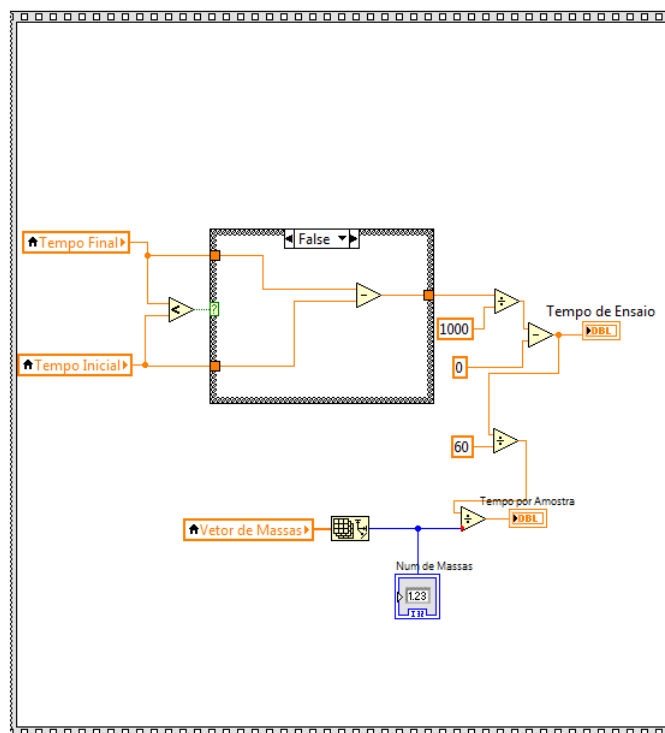


Figura 49 – Quadro 1 do Refinamento de Dados

O segundo quadro da estrutura, mostrado na figura 50, corresponde à rotina do código responsável pela geração dos gráficos mostrados na interface do usuário, da seção 4.2. Todos os gráficos são gerados depois da execução de uma estrutura de repetição *For*. Primeiro é definido o número de repetições do laço *For*, que corresponde ao número de

amostras presente no vetor ‘Amostras’, sendo esse valor obtido através da função *Array Size*. Com isso a estrutura *For* é iniciada e nela são montados três vetores que são utilizados para a construção dos quatro gráficos.

O primeiro vetor montado corresponde ao vetor de vazão mássica da balança. Primeiro cada valor do vetor ‘Vetor de Massas’ é acessado através da função *Index Array Function* e dividido por 1000 para que tenha-se a massa em kilogramas. O valor é então dividido pelo valor de tempo acumulado através de um *Shift Register* que soma o valor de tempo de cada amostra a cada iteração. O resultado da divisão é utilizado como parâmetro de entrada para a montagem do vetor que contém os valores de vazão mássica da balança, feito inserindo-se a cada iteração o novo valor no vetor através da função *Insert Into Array Function*. Esse vetor é utilizado para a construção dos gráficos ‘Gráfico de Vazões Mássicas’ e ‘Gráfico de Erro’.

O segundo vetor montado corresponde ao vetor que contém a integral das vazões mássicas da balança, ou seja, a soma dos valores de vazão mássica da balança a cada iteração. Isso é feito através de um *Shift Register* que faz a soma dos valores que foram utilizados para construção do vetor descrito no parágrafo acima. O valor de cada uma dessas sucessivas somas é utilizado como parâmetro de entrada para a montagem do vetor que contém a integral da vazão mássica da balança, feito inserindo-se a cada iteração o novo valor no vetor através da função *Insert Into Array Function*. Esse vetor é utilizado para a construção dos gráficos ‘Gráfico Integrais’ e ‘Gráfico Diferença’.

O terceiro vetor montado corresponde ao vetor que contém a integral das vazões mássicas do medidor Coriolis, ou seja, a soma dos valores de vazão mássica do medidor Coriolis a cada iteração. Primeiro cada valor do vetor ‘Amostras’ é acessado através da função *Index Array Function* e somado através de um *Shift Register* que faz a soma com os valores das iterações anteriores. O valor de cada uma dessas sucessivas somas é utilizado como parâmetro de entrada para a montagem do vetor que contém a integral da vazão mássica do medidor Coriolis, feito inserindo-se a cada iteração o novo valor no vetor através da função *Insert Into Array Function*. Esse vetor é utilizado para a construção dos gráficos ‘Gráfico Integrais’ e ‘Gráfico Diferença’.

Portanto, cada um dos gráficos é formado por:

- ‘Gráfico de Vazões Mássicas’: formado pelo vetor ‘Amostras’ e pelo vetor ‘Vazão Mássica Balança’;
- ‘Gráfico de Erro’: formado pela subtração entre o vetor ‘Amostras’ e o vetor ‘Vazão Mássica Balança’;
- ‘Gráfico Integrais’: formado pelo vetor da integral da vazão mássica da balança e pelo vetor da integral da vazão mássica do medidor Coriolis;

- ‘Gráfico Diferença’: formado pela subtração entre o vetor da integral da vazão mássica da balança e o vetor da integral da vazão mássica do medidor Coriolis.

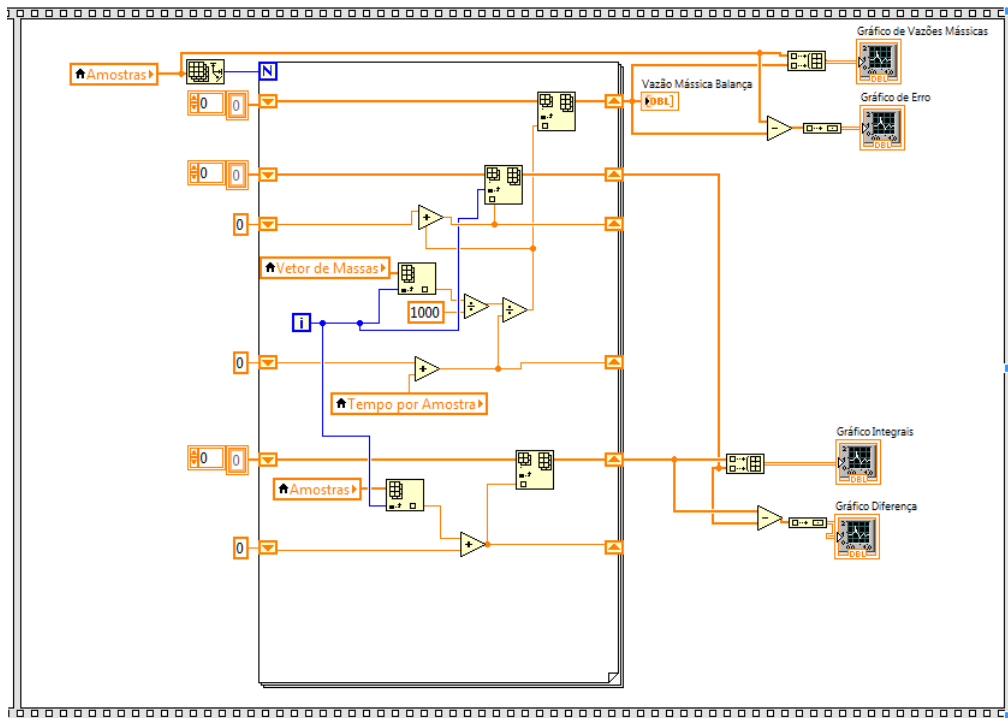


Figura 50 – Quadro 2 do Refinamento de Dados

O terceiro quadro da estrutura, mostrado na figura 51, faz o tratamento de alguns dados do ensaio que devem ser adequados antes que ocorra a manipulação dos mesmos para obtenção dos resultados. Assim, nessa parte do código, são retirados os dados referentes às primeiras 40 amostras obtidas na etapa de aquisição de dados. Para isso, primeiramente é tomado o valor da massa que estava sobre a balança no momento que a quadragésima amostra foi lida. Essa operação é realizada através da função *Index Array Function*, que recebe como parâmetros de entrada o vetor ‘Dados’ juntamente com a linha e coluna do dado desejado. Como esse valor de massa está no formato *string* é necessário transformá-lo no formato *double* através da função *Fract/Exp String To Number Function*, sendo este valor armazenado na variável ‘Massa inicial’. Depois disso, são eliminadas as 40 primeiras amostras do vetor ‘Amostras’, através da função *Delete From Array Function*. Toda essa manipulação deve ser feita porque a vazão mássica no momento que o caminho de escoamento do fluido é alterado do sentido tanque reservatório → tanque de descarga para o sentido tanque reservatório → balança há uma diminuição de vazão, e, dessa forma, é preciso de um tempo para que a vazão mássica entre em regime no seu novo valor, tempo esse equivalente a 40 amostras de dados.

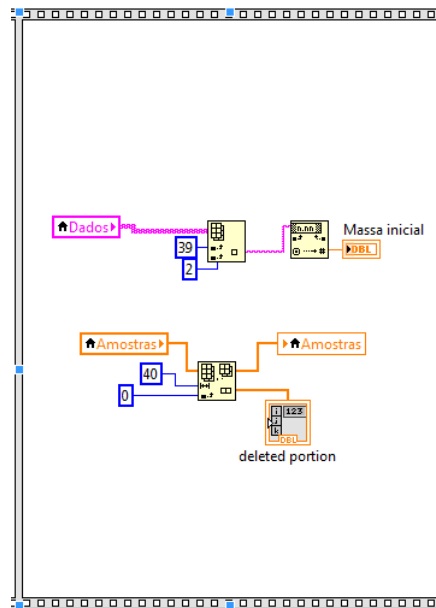


Figura 51 – Quadro 3 do Refinamento de Dados

4.6 Cálculos dos Resultados dos Ensaios

A quarta etapa do *software* que realiza os cálculos dos resultados dos ensaios tem seu fluxograma mostrado na figura 52, sendo seu código mostrado mais detalhadamente na figura 53.

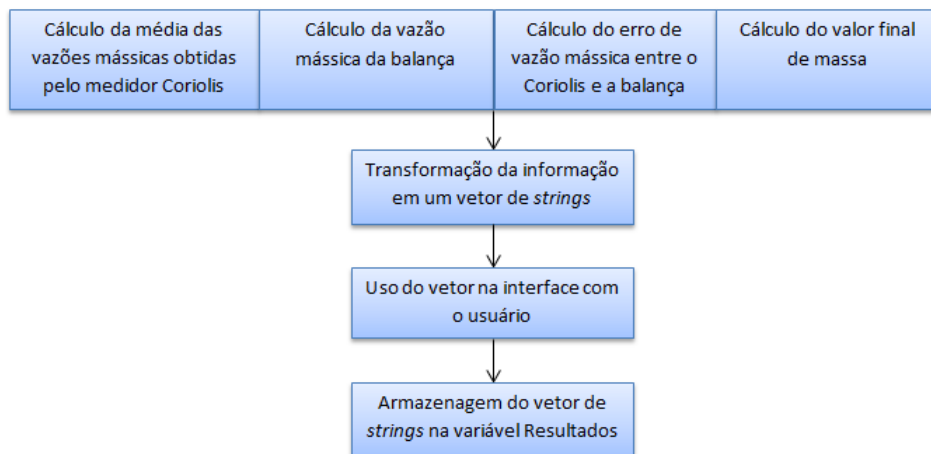


Figura 52 – Fluxograma para Cálculo dos Resultados dos Ensaios

O primeiro cálculo realizado é a vazão mássica média das leituras feitas pelo medidor de vazão mássica Coriolis, mostrado na figura 54, que será o valor que posteriormente será comparado com o valor de vazão mássica expressa através da balança, gerando os erros de cada ensaio. A média das vazões mássicas lidas pelo medidor Coriolis é obtida através da função *Mean VI* que tem como parâmetro de entrada o vetor variável ‘Amostras’ e tem como resultado a média dos valores do vetor, média essa que é salva na variável de

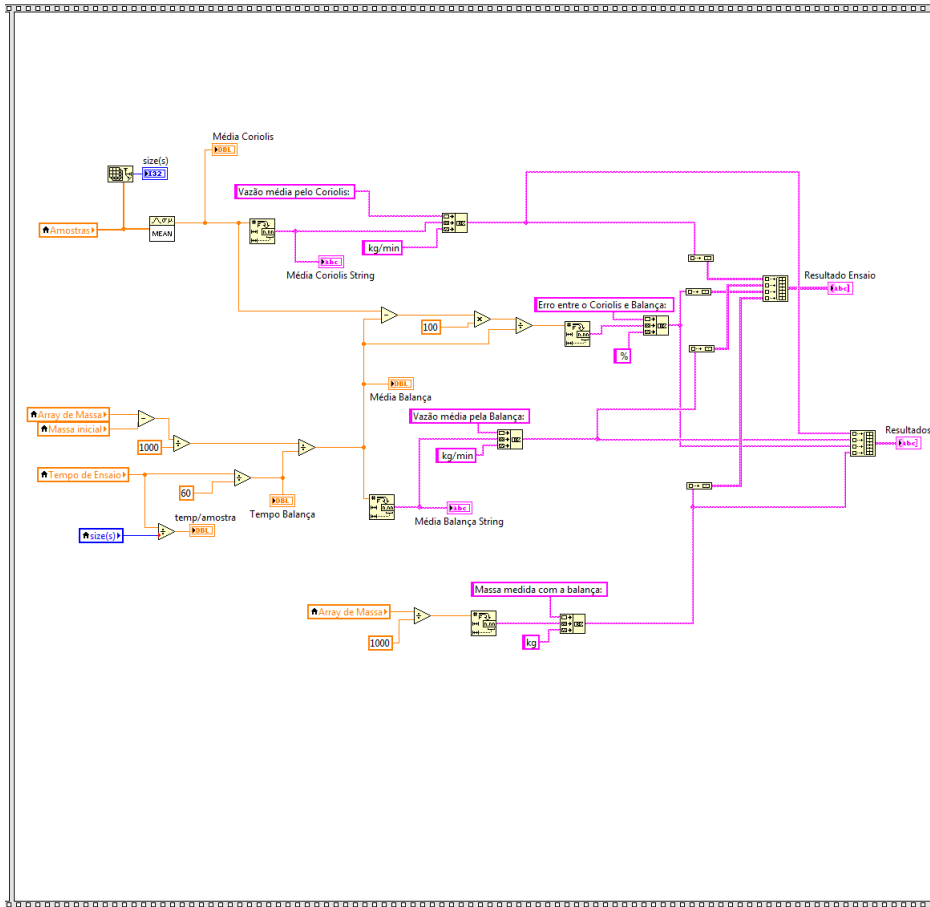


Figura 53 – Código para Cálculo dos Resultados dos Ensaios

observação ‘Média Coriolis’. Após esse cálculo, a média obtida é convertida em *string* através da função *Number To Fractional String Function* e armazenada na variável de observação ‘Média Coriolis String’.

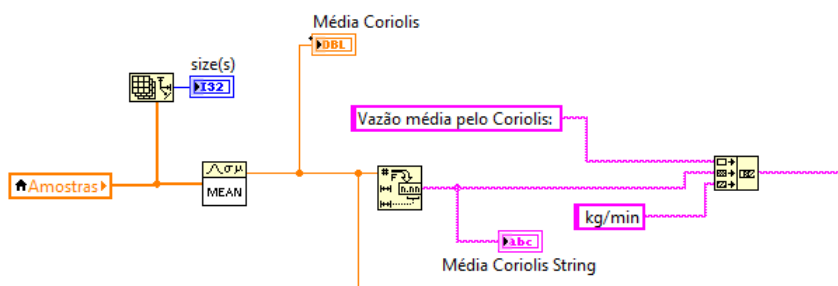


Figura 54 – Código para Cálculo da Vazão Mássica Média do Medidor Coriolis

O segundo cálculo realizado é a vazão mássica obtida através da leitura de massa da balança, mostrada na figura 55, que será o valor que posteriormente será comparado com o valor de vazão mássica média do medidor Coriolis, gerando os erros de cada ensaio. O cálculo da vazão mássica da balança inicia-se com uma operação de subtração entre a variável ‘Array de Massa’, que contém a massa final sobre a balança, e a variável ‘Massa

inicial’, que contém a massa considerada como inicial segundo exposto na seção 4.5. O resultado dessa operação é então dividido por 1000, já que as massas são medidas em gramas (g) e devem ser expressas em quilogramas (kg), pois a medida de vazão mássica do medidor Coriolis é expressa em kg/min. Depois do cálculo da massa total, é feito o cálculo de tempo total, onde a variável ‘Tempo de Ensaio’, que contém o tempo em segundos, é dividida por 60, resultando no tempo de ensaio em minutos. Assim, a massa total é dividida pelo tempo resultando na vazão mássica medida, indiretamente, pela balança em kg/min. Esse valor é então convertido em *string* através da função *Number To Fractional String Function* e armazenado na variável de observação ‘Média Balança String’.

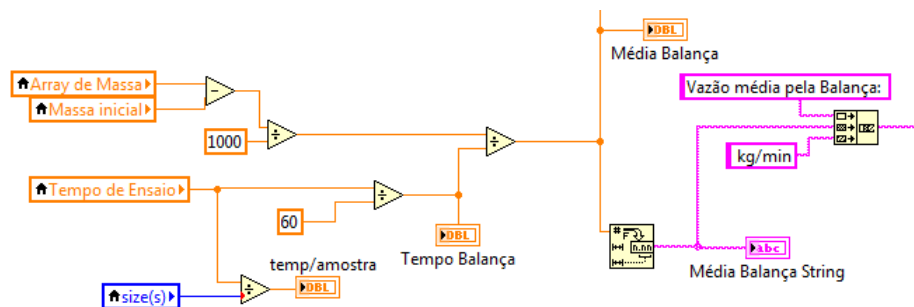


Figura 55 – Código para Cálculo da Vazão Mássica pela Balança

O terceiro cálculo realizado nesta etapa de cálculos dos resultados dos ensaios, é o erro que existe entre a vazão mássica média obtida pelo medidor Coriolis e a vazão mássica obtida pela balança, mostrado na figura 56. Esse cálculo é iniciado com uma subtração entre a vazão mássica média do medidor Coriolis e a vazão mássica da balança. O resultado dessa operação é então multiplicado por 100. Após isso, o valor é dividido pelo valor de vazão mássica da balança, contido na variável ‘Média Balança’, sendo essa operação realizada para que se tenha um valor de erro em relação à vazão mássica obtida pela balança em %. Esse valor é então convertido em string através da função *Number To Fractional String Function*.

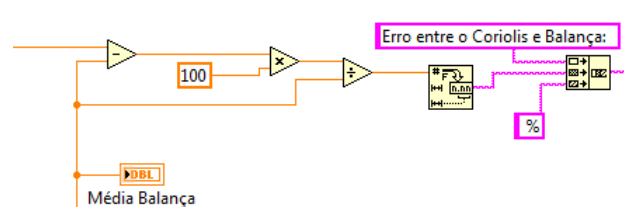


Figura 56 – Código para Cálculo do Erro

A quarta rotina executada nesta etapa do código, mostrada na figura 57, é realizada para mostrar na interface com o usuário o valor final de massa de fluido indicado pela balança. Para isso, primeiramente o dado correspondente a esse valor que está armazenado na variável ‘Array de Massa’, é dividido por 1000, transformando o valor que está em

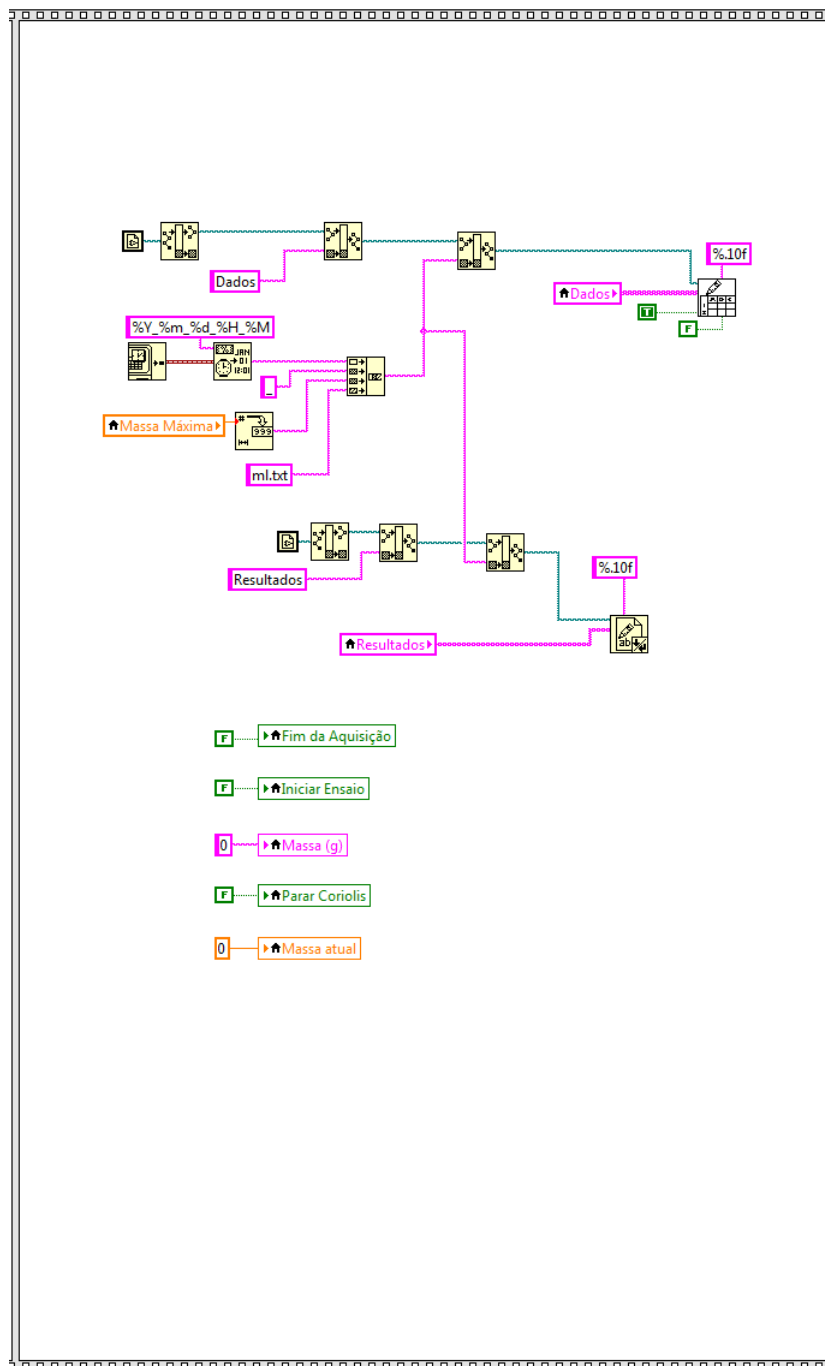


Figura 59 – Código para Criação dos Arquivos de Dados

controle do ensaio e é necessário que antes de um novo ensaio, elas voltem ao modo que devem estar em cada início de ensaio. Isso é mostrado na figura 60.

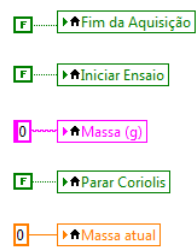


Figura 60 – Código para Alteração de Variáveis

5 Metodologia de Ensaio

Neste capítulo serão explicados os passos e ações que devem ser tomadas antes e depois de cada ensaio realizado, abordando assim a metodologia aplicada para cada um deles.

Algumas das ações descritas neste capítulo não são necessárias que sejam aplicadas em todos os ensaios realizados, pois possuem características de adequação do equipamento e da bancada para que tenha-se condições de realizar um ensaio. Um exemplo dessas ações é zerar o medidor de vazão mássica Coriolis.

5.1 Procedimentos Gerais nos Ensaio

Nesta seção serão descritos alguns passos que devem ser seguidos e observados antes de iniciar qualquer um dos ensaios. Para um melhor entendimento dos procedimentos que devem ser seguidos, eles foram organizados em um fluxograma no formato ANSI, mostrado na figura 61.

Como pode ser visto no fluxograma, os procedimentos para realização de um ensaio apresentam uma divisão em duas etapas, sendo a primeira correspondente aos passos de preparação para o ensaio, que ocorrem antes do mesmo ser iniciado, e a segunda parte correspondente aos passos de execução do ensaio, que ocorrem com o mesmo já iniciado.

Na etapa de preparação para o ensaio, primeiro deve-se ligar alguns dos equipamentos que serão utilizados, sendo eles a balança, o medidor de vazão mássica Coriolis e o sistema de aquisição. A bomba de alimentação não pode ser ligada neste momento, pois deve-se garantir que haja fluido no tanque de descarga e que a câmara da bomba esteja cheia de fluido, como explicado na seção 3.4 do capítulo 3. Depois disso, deve-se verificar se as tubulações estão bem conectadas e se estão conectadas as entradas e saídas corretas. Após isso, deve-se adicionar fluido no tanque de descarga até que seja atingido a marca de 10 litros de fluido em seu interior, para então ser possível ligar a bomba de alimentação. Com a bomba de alimentação ligada, deve-se continuar adicionando fluido no tanque de descarga, até que haja fluxo de fluido vindo do tanque reservatório para o tanque de descarga através do extravasor, e até que tenha-se 10 litros nesse tanque. Por fim nesta etapa, deve-se tampar o tanque de descarga para que não ocorra nem vazamento do fluido e nem a entrada de algum tipo de sujeira no tanque, com a possibilidade de causar alguma obstrução em partes da tubulação ou equipamentos.

Após terminada a etapa de preparação, pode-se iniciar o ensaio propriamente dito. Primeiro deve-se conectar as portas USB do computador a placa de aquisição NI USB-6009

e a balança e, em seguida, inicializa-se o *software*. Então deve-se fazer o procedimento de tara da balança, ou seja, com o reservatório que receberá o fluido a ter sua massa aferida sobre a balança, é feita a zeragem da massa indicada pela mesma. Depois é feita a escolha, através do *software* de aquisição de dados, da massa máxima de fluido que será depositada sobre a balança, e que indica o fim de cada ensaio. O passo seguinte é uma recomendação de segurança a fim de evitar problemas como vazamento, que consiste em verificar durante os ensaios se os equipamentos estão funcionando de maneira correta, através de acompanhamento do ensaio. O último passo é esperar até que o ensaio seja encerrado, e iniciar um novo ensaio, caso seja desejado, a partir do passo de tarar a balança.

5.2 Zerar Equipamentos

O procedimento de zerar um equipamento é de suma importância para que se obtenham medições confiáveis em um ensaio. Este procedimento deve ser realizado antes que se comece a obtenção dos dados, pois somente assim, tem-se a garantia de que o equipamento fará as medições desejadas com as características metrológicas indicadas pelo fabricante.

5.2.1 Zerar o Medidor de Vazão Mássica Coriolis

O processo de zerar o medidor Coriolis é de grande importância para que se atinja resultados confiáveis, visto que para cada mudança nas condições de operação na qual o mesmo está inserido, altera também o zero do medidor Coriolis. Essa alteração do zero ocasiona erros na medição efetuada e, assim, torna o ensaio realizado inválido.

Zerar o medidor de vazão mássica Coriolis garante que o mesmo apresente as características metrológicas fornecidas pelo fabricante. Após realizar o procedimento, a incerteza de medição indicada pelo fabricante para este modelo de medidor, é de 0,03% do máximo valor de escala da vazão e mais a parcela da estabilidade do zero de 0,0001 kg/min [30].

O processo é realizado em três passos simples, indicados no manual do fabricante:

- primeiro, deve-se ligar o equipamento e aplicar a vazão de fluido próxima a que ele será submetido em operação normal durante um período de 15 minutos, tempo esse suficiente para que a tubulação interna do medidor seja totalmente preenchida pelo fluido a ser medido e que se eliminem possíveis bolhas de ar;
- depois, deve-se fechar completamente a válvula de saída do medidor para que se tenha certeza de que a tubulação do mesmo apresente apenas o fluido de interesse e nenhuma bolha de ar;

- por último, observa-se o LED indicador do zero, que acende com cor vermelha para indicar fluxo de fluido na direção contrária àquela definida pelo fabricante e com cor verde para indicar fluxo na direção correta. Deve-se, então, girar o potenciômetro ao lado do LED indicador até que esse permaneça apagado ou que não ocorram mais de cinco trocas entre as cores do LED. Feito isso, o segundo e terceiro passos devem ser repetidos e então está realizado o ajuste de zero do equipamento.

O processo descrito nesta seção não é necessário ser repetido a cada ensaio realizado, pois é um procedimento independente das características dos ensaios realizados. A necessidade de refazer os três passos do processo de zerar o medidor Coriolis seria indicado caso houvesse uma mudança de local de instalação do equipamento, por exemplo, ou a abertura do REU para alguma averiguação, o que não foi necessário ou feito após iniciados os ensaios. Dessa forma, o procedimento de zerar o medidor de vazão mássica Coriolis foi realizado apenas uma única vez antes do início do período de testes.

5.2.2 Nivelar a Balança

Como a balança é um equipamento que já possui uma calibração feita pelo fabricante, foi necessário apenas nivelar a mesma no suporte da bancada. Esse procedimento é realizado para que haja uma distribuição uniforme de massa no prato da balança, evitando erros devido a ter maior massa em um lado do recipiente sobre a balança do que no outro.

O procedimento exposto acima é realizado observando o nível que existe atrás da balança. Nele há uma pequena bolha de ar e um círculo central fixo no mostrador do nível. Para que a balança esteja nivelada corretamente, deve-se manter a bolha dentro do círculo e, isso é feito, aumentando ou diminuindo a altura dos pés da balança, que são ajustáveis.

Outro procedimento realizado na balança é o processo de tara, que é feito antes do início de todos os ensaios, para que a massa do recipiente onde é depositado o fluido não influencie na medição.

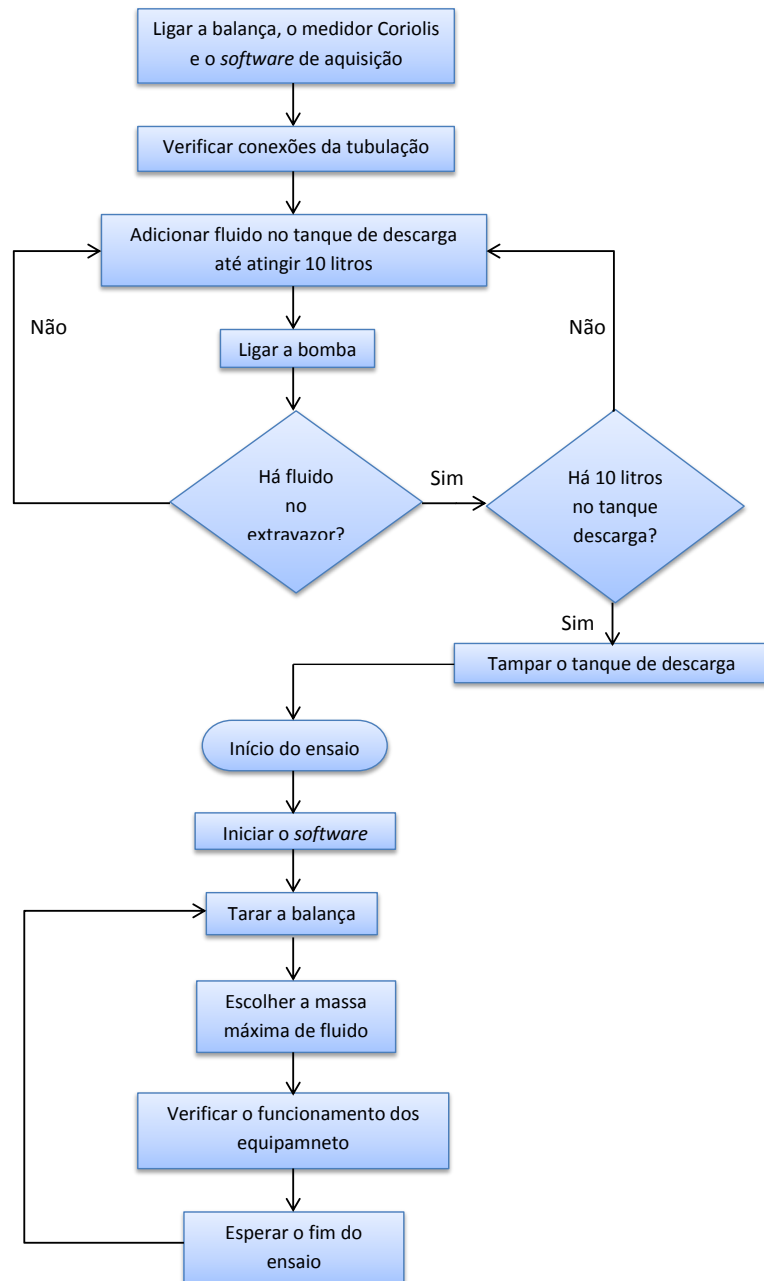


Figura 61 – Fluxograma para Realização de Ensaio

6 Resultados Obtidos

Neste capítulo do documento serão expostos os resultados obtidos após o desenvolvimento da bancada. Esses resultados foram alcançados após a realização de todos os passos descritos nos capítulos anteriores.

6.1 Tabelas de Resultados dos Ensaios

Nesta seção serão mostradas as tabelas com os resultados de diversos ensaios realizados na bancada de ensaios obtidos em diferentes dias de ensaios.

As tabelas a seguir mostram os resultados de ensaios que foram realizados na bancada proposta. Esses ensaios foram realizados aplicando água como fluido de trabalho, a fim de validar a bancada de ensaios e o sistema de aquisição propostos. A água foi escolhida como fluido de trabalho devido ao fato de que se conhece o comportamento do medidor de vazão Coriolis com ela, uma vez que a calibração do medidor é realizada aplicando água. Cada um dos ensaios realizados segue a mesma metodologia de execução, além da tentativa de manter as condições que envolvem os elementos da bancada as mais próximas possíveis umas das outras em cada um desses ensaios. Cada uma das tabelas foi construída de acordo com a faixa de valores de massa máxima depositada sobre a balança. Os valores positivos de erro em porcentagem indicam que o valor de vazão mássica medido pelo medidor Coriolis foi maior que o medido pela balança. Já os valores negativos de erro em porcentagem indicam que o valor de vazão mássica medido pelo medidor Coriolis foi menor que o medido pela balança.

Para a montagem da tabela, o primeiro passo é verificar a influência do empuxo sobre a medição feita pela balança, representando o ramo sistema de medição do diagrama de Ishikawa da figura 62. Para isso, é usada a equação (6.1):

$$m_c = w \left[1 + \rho_{ar} \left(\frac{1}{\rho_{fluido}} - \frac{1}{\rho_{pesos}} \right) \right] \quad (6.1)$$

- m_c representa a massa corrigida com a influência do empuxo;
- w representa a massa medida;
- ρ_{ar} representa a densidade do ar;
- ρ_{fluido} representa a densidade do fluido;
- ρ_{pesos} representa a densidade dos pesos padrão de calibração da balança.

Os valores utilizados para cada uma das variáveis na equação (6.1) foram:

- $\rho_{ar} = 1,2041 \text{ kg/m}^3$ à 20°C e pressão ao nível do mar;
- $\rho_{fluido} = 998,2 \text{ kg/m}^3$ à 20°C ;
- $\rho_{pesos} = 8000 \text{ kg/m}^3$, sendo esse um valor padrão de densidade dos pesos padrão de calibração da balança.

Isso resulta em uma massa corrigida com a influência do empuxo de:

$$m_c = 1,0011w \quad (6.2)$$

Esse valor de m_c mostra que há um erro causado pela ação do empuxo sobre a medição da balança que multiplica o valor medido por 1,0011. Esse erro deve ser considerado no valor do Δm que será utilizado para o cálculo da vazão mássica da balança.

A tabela 1 traz os resultados obtidos através de bancada de ensaios, para uma massa máxima de fluido sobre a balança no valor de 100 g.

Tabela 1 – Resultados de ensaios com massa máxima de 100 gramas

Ensaio	Massa Máxima (g)	Vazão do Coriolis (kg/min)	Vazão da Balança (kg/min)	Erro (%)
1	100	0,0643	0,0634	1,42
2	100	0,0671	0,0663	1,21
3	100	0,0648	0,0642	0,93
4	100	0,0775	0,0764	1,40
5	100	0,0778	0,0764	1,88

A tabela 2 traz os resultados obtidos através de bancada de ensaios, para uma massa máxima de fluido sobre a balança no valor de 200 g.

Tabela 2 – Resultados de ensaios com massa máxima de 200 gramas

Ensaio	Massa Máxima (g)	Vazão do Coriolis (kg/min)	Vazão da Balança (kg/min)	Erro (%)
1	200	0,0792	0,0791	0,13
2	200	0,0793	0,0791	0,25
3	200	0,0793	0,0791	0,25
4	200	0,0793	0,0788	0,63
5	200	0,0794	0,0791	0,38

A tabela 3 traz os resultados obtidos através de bancada de ensaios, para uma massa máxima de fluido sobre a balança no valor de 500 g.

Tabela 3 – Resultados de ensaios com massa máxima de 500 gramas

Ensaio	Massa Máxima (g)	Vazão do Coriolis (kg/min)	Vazão da Balança (kg/min)	Erro (%)
1	500	0,0775	0,0782	-0,90
2	500	0,0784	0,0790	-0,76
3	500	0,0788	0,0795	-0,88
4	500	0,0789	0,0796	-0,88
5	500	0,0789	0,0798	-1,13

A tabela 4 traz os resultados obtidos através de bancada de ensaios, para uma massa máxima de fluido sobre a balança no valor de 1000 g.

Tabela 4 – Resultados de ensaios com massa máxima de 1000 gramas

Ensaio	Massa Máxima (g)	Vazão do Coriolis (kg/min)	Vazão da Balança (kg/min)	Erro (%)
1	1000	0,0776	0,0770	0,78
2	1000	0,0782	0,0776	0,77
3	1000	0,0786	0,0780	0,76
4	1000	0,0788	0,0784	0,51
5	1000	0,0789	0,0785	0,51

6.2 Cálculos das Incertezas de Medição

Nesta seção serão mostrados os cálculos necessários a serem realizados para encontrar as incertezas de medição para os valores encontrados nos ensaios realizados na bancada [12]. Os cálculos aqui mostrados terão como base os dados obtidos nos ensaios com massa máxima no valor de 1000 gramas (1 quilograma), pois nesse valor de massa a balança apresenta melhores e mais confiáveis resultados devido sua calibração.

O objetivo dos cálculos realizados nesta seção é encontrar o resultado de medição (RM) da vazão mássica expressa por cada equipamento empregado na bancada no formato padrão utilizado na metrologia que consiste em:

$$RM = \bar{I} \pm U_c \quad (6.3)$$

Onde:

- RM representa o resultado da medição;
- \bar{I} representa a média das indicações do instrumento de medida;
- U_c representa a incerteza combinada.

6.2.1 Incerteza de Medição da Vazão Mássica pelo Método

Na figura 62 é mostrado o diagrama de Ishikawa para a determinação das possíveis causas de erro na medição de massa.

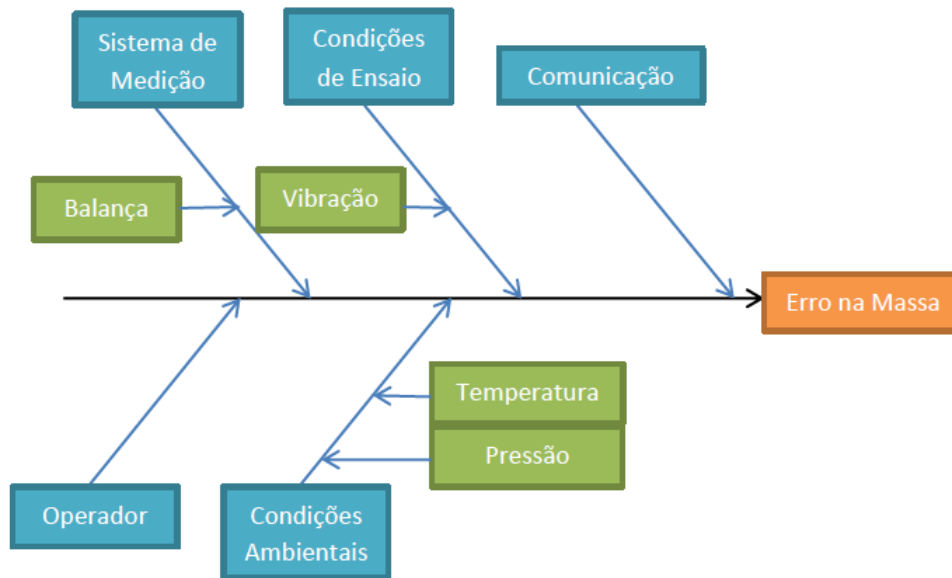


Figura 62 – Diagrama Ishikawa para o Erro na Medição da Massa

Os cálculos das incertezas de medição realizados nessa seção e na seção 6.2.2, terão como base as informações do ensaio representado pela primeira linha da tabela 4.

Como a vazão mássica expressa pela balança é obtida através da função (6.4), deve-se realizar os cálculos de incertezas para cada grandeza e depois calcular a incerteza padrão combinada para obter o resultado de medição no formato (6.3):

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_{final} - m_{inicial}}{\Delta t} \quad (6.4)$$

Tomando os valores da massa final m_{final} que tinha o valor de 1001,98 g passa a ser 1003,08 g, após a aplicação da correção da influência do empuxo. Já a massa inicial $m_{inicial}$, considerada no ponto onde a vazão mássica da balança atingiu o assentamento de seus valores, que tinha o valor de 293,32 g passa a ser 295,92 g. Dessa forma, o valor de Δm é 707,16 g.

De posse destes valores, pode-se analisar as demais fontes de incertezas ligadas à balança que são conhecidas, como a incerteza associada à resolução da balança $R_B = 0,01$ g, a incerteza associada à repetibilidade da balança $Re_B = \pm 0,01$ g, a incerteza associada à linearidade da balança $Lin_B = 0,02$ g e a incerteza associada à deriva de temperatura da balança $= 3 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \cdot \Delta m$ que no ensaio realizado tem o valor de 0,01072 g.

As incertezas padrão relacionadas a cada uma das características mencionadas anteriormente são:

- $u_R = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,006$, incerteza da resolução;
- $u_{Re} = \pm \frac{0,01}{2} = 0,005$, incerteza da repetibilidade;
- $u_{Lin} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,012$, incerteza da linearidade;
- $u_{dT} = \frac{0,01072}{\sqrt{3}} = 0,006$, incerteza da deriva de temperatura.

Como essas incertezas estão relacionadas à medição de massa pela balança e a massa utilizada no cálculo da vazão mássica é obtida através de uma operação de subtração entre a massa final e a massa inicial, deve-se usar a combinação das incertezas anteriores decorrente da subtração e, assim, encontrar a incerteza expandida associada a medição da massa u_m . Esse cálculo é dado pela equação (6.5):

$$u_m = \sqrt{2u_R^2 + 2u_{Re}^2 + 2u_{Lin}^2 + u_{dT}^2} = 0,021 \quad (6.5)$$

Para a análise da incerteza relacionada ao tempo do ensaio é utilizada a equação (6.6):

$$u_{\Delta t} = \frac{2\Delta t}{\Delta t_{total}} = 1,14s \quad (6.6)$$

Com o valor da incerteza expandida da massa e do tempo de ensaio, pode-se calcular a incerteza combinada da vazão mássica dada pela equação (6.7).

$$U_Q = t \cdot u_Q \quad (6.7)$$

Para isso, primeiro é necessário calcular a incerteza expandida da vazão mássica através da equação (6.8), que diz respeito à incerteza da divisão. Depois é necessário saber o número de graus de liberdade efetivos de cada incerteza da balança. Como esses dados foram obtidos através da calibração feita pelo fabricante, pode-se assumir que os graus de liberdade efetivos são infinitos e, assim, a incerteza da massa também possui grau de liberdade efetivo infinito, tendo um *t-student* igual a 2.

$$u_Q = u \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right) = \sqrt{\frac{\Delta m}{\Delta t} \left[\frac{u_{\Delta m}^2}{\Delta m} + \frac{u_{\Delta t}^2}{\Delta t} \right]} = 0,067 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 1,12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (6.8)$$

Dessa forma, a incerteza combinada da vazão mássica da balança vale $2,24 \cdot 10^{-6}$ kg/min. Assim, o resultado de medição para o ensaio é: $RM = (0,07790661 \pm 0,000002)$ kg/min.

6.2.2 Incerteza de Medição da Vazão Mássica pelo Coriolis

No cálculo para a incerteza de medição do medidor Coriolis, para que se possa expressar a vazão mássica no formato (6.3), é necessário conhecer as fontes de incertezas presentes no medidor. São elas a incerteza da estabilidade do zero $E_z = 0,0001$ kg/min, a incerteza do erro combinado $E_c = 0,0005$ kg/min e a incerteza da resolução da placa de aquisição $R_p = 0,00003$ kg/min.

As incertezas relacionadas à cada uma das características mencionadas anteriormente são:

- $u_{E_z} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00006$, incerteza da estabilidade do zero;
- $u_{E_c} = \frac{0,0005}{2} = 0,00025$, incerteza do erro combinado;
- $u_{R_p} = \frac{0,00003}{\sqrt{3}} = 0,000018$, incerteza da resolução da placa de aquisição.

Com esses valores de incertezas da medição do Coriolis pode-se calcular a incerteza expandida da vazão mássica dada pela equação (6.9):

$$u_Q = \sqrt{u_{E_z}^2 + u_{E_c}^2 + u_{R_p}^2} = 2,57 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (6.9)$$

Dessa forma, a incerteza combinada da vazão mássica do medidor Coriolis vale $5,14 \cdot 10^{-4}$ kg/min. Assim, o resultado de medição para o ensaio é: $RM = (0,0778 \pm 0,0005)$ kg/min.

6.2.3 Considerações sobre a Automação dos Ensaiois

Com a aplicação da automação empregada no projeto como um todo, foi possível melhorar o desempenho dos ensaios realizados em relação aqueles feitos antes da automação.

A bancada antes da automação, apresentava erros na ordem de grandeza de 3 a 4 vezes maior que a presente nos ensaios após a aplicação da automação da bancada. Essa grande diminuição do erro ocorreu devido ao fato de que fontes de erros que estavam relacionadas ao caráter manual da bancada sem automação, não existem mais após a automação da bancada. Essas fontes de erros estavam ligadas a atuação do usuário sobre a bancada de ensaios, que tinha o papel de manter o nível do tanque reservatório por inspeção visual, atuando sobre a bomba de alimentação, e, principalmente, a mudança de caminho de escoamento do fluido para a balança, que também era uma operação manual.

Com a aplicação da automação sobre a bancada, além da escolha dos equipamentos necessários para a correta operação da mesma, os ensaios realizados na bancada são independentes das habilidades do usuário, o que traz maior confiabilidade nos resultados obtidos e, por consequência uma diminuição bastante considerável dos erros apresentados.

Para que se tenha a noção da diminuição dos erros e do aumento da confiabilidade da bancada após a aplicação da automação da mesma, pode-se observar o desvio padrão obtido em ensaios antes e após a automação. Em ensaios anteriores à automação o desvio padrão dos erros nos ensaios era de 0,606%, dados obtidos da tabela 5. Com a aplicação da automação da bancada o desvio padrão dos erros nos ensaios teve uma redução bastante significativa, atingindo o valor de 0,031% para ensaios com massa máxima de 1000 g.

Tabela 5 – Resultados de ensaios para bancada sem automação

Ensaio	Massa Máxima (g)	Vazão do Coriolis (kg/min)	Vazão da Balança (kg/min)	Erro (%)
1	600	0,0597	0,0570	4,62
2	600	0,0684	0,0654	4,44
3	600	0,0948	0,0897	5,36
4	600	0,0945	0,0888	6,04
5	600	0,0931	0,0877	5,81
6	600	0,0920	0,0871	5,30
7	600	0,0910	0,0870	4,54
8	600	0,0758	0,0726	4,19
9	600	0,0872	0,0834	4,34
10	600	0,0900	0,0859	4,58
11	600	0,0684	0,0657	3,97
12	600	0,0789	0,0751	4,90
13	600	0,0754	0,0718	4,76
14	600	0,0880	0,0842	4,27
15	600	0,0875	0,0840	4,03

Dessa forma, pode-se perceber que o objetivo de fazer a automação da bancada e com isso obter resultados e ensaios confiáveis foi atingido, uma vez que o erro obtido após a aplicação da automação apresenta valores bastante satisfatórios, já que os resultados de medição de vazão mássica pelo medidor Coriolis e pelo método aplicado apresentam uma região comum bastante grande, como pode ser observado na figura 63, que traz os resultados de medição obtidos nas seções 6.2.1 e 6.2.2.

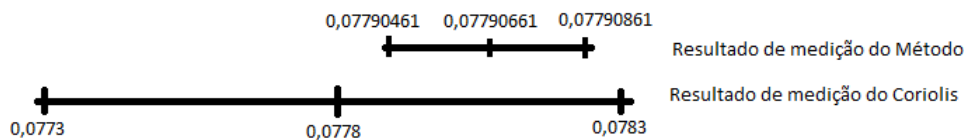


Figura 63 – Intervalo de Medição para o Medidor Coriolis e para o Método

7 Conclusões e Perspectivas

O trabalho realizado teve como principal objetivo realizar a automação de uma bancada de calibração de medidores de vazão, a fim de tornar os ensaios aplicados sobre a bancada e, por consequência os resultados obtidos com a mesma, menos influenciados pela atuação do usuário possível. Esse objetivo foi atingido, uma vez que todas as etapas de aquisições de dados, manipulações de dados, manipulações de variáveis do método, medições e tomadas de decisões são realizados de forma automática.

Dessa forma, pode-se dizer que o resultado esperado que consistia em retirar as parcelas de erros existentes devido às ações e atuações do usuário sobre a bancada e o processo, foi atingido.

Sobre os objetivos secundários, também pode-se dizer que foram atingidos uma vez que a bancada de ensaios construída foi montada de acordo com o método de calibração proposto e estudado, utilizando os equipamentos adequados para a realização dos ensaios. No que diz respeito a validação da bancada, esse também foi um objetivo atingido, uma vez que os resultados dos ensaios foram satisfatórios, sendo todos esses resultados armazenados para posteriores análises em projetos futuros.

Quanto as projetos futuros que podem ser contemplados com base na continuação desse projeto, tem-se a realização de um projeto no qual seja possível a utilização de diferentes fluidos sobre o medidor instalado na bancada atual, a fim de obter informações sobre seu comportamento com essas mudanças. Outro projeto, que possui uma linha semelhante, seria aplicar diferentes medidores de vazão para obter suas características utilizando diferentes fluido. Uma outra possibilidade seria a utilização da bancada para comparação com diferentes métodos de calibração.

Referências

- 1 ENGEL, R.; BEYER, K.; B, H. J. Design and realization of the high-precision weighing systems as the gravimetric references in ptb's national water flow standard. 2012. Citado 3 vezes nas páginas 9, 36 e 37.
- 2 CASSIOLATO, C.; ORELLANA, E. *Medição de Vazão*. 2010. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index40.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 25 e 26.
- 3 MIRANDA, J. *Efeito Coriolis*. Disponível em: <<http://www.sitedecuriosidades.com/curiosidade/efeito-coriolis.html>>. Citado na página 21.
- 4 DOMELEN, D. J. V. *ENTENDENDO A FORÇA DE CORIOLIS*. 2003. Disponível em: <http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Elisa/flg0355/filespdf/For%C3%A7a_de_Coriolis.pdf>. Citado na página 21.
- 5 RODRIGUES, L. E. M. J. *Aula 10 – escoamento laminar e turbulento*. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/aula10.pdf>>. Citado na página 22.
- 6 LIVI, C. P. *Fundamentos de Fenômenos de Transporte*. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 206 p. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- 7 FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 798 p. Citado na página 23.
- 8 PINOTTI, M. *Notas de aula - Mecânica dos Fluidos - Prof. Marcos Pinotti*. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/aerodesign/Biblioteca/pdf/Mec>>. Citado na página 23.
- 9 RIBEIRO, M. A. *Medição de Vazão*. 5. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria, 1997. 345 p. Citado na página 24.
- 10 BRANCO, R. *Processo contínuo de fabricação na indústria*. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/2448-processo-continuo-de-fabricacao-na-industria/>>. Citado na página 25.
- 11 JCGM. *Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição*. 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 83.
- 12 ANP; CONMETRO. Regulamento técnico de medição de petróleo e gás natural. portaria anp/inmetro. In: . [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 26.
- 13 CHAVES, L. Medição de vazão. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 29 e 32.
- 14 THESING, L. A.; REGO, R. do; SCHNEIDER, P. S. Medidor de vazão por deformação elástica. Citado na página 28.
- 15 SANTOS, V. d. C. M. d. et al. A medição fiscal dos volumes de petróleo: medidores ultrassônicos. Niterói, 2016. Citado na página 28.

- 16 EFFTING, H. M.; CARDOSO, G. H. *CALHA PARSHALL*. 2013. Disponível em: <<http://fenomenosdaengenharia.blogspot.com.br/2013/06/calha-parshall.html>>. Citado na página 29.
- 17 BERGMANN, G. Avaliação metrológica de sistemas de medição de vazão. 2012. Citado na página 30.
- 18 CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos-3*. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. Citado na página 31.
- 19 MELO, F. B. *Avaliação metrológica da incerteza na medição de vazão mássica de gases com tecnologias volumétrica e pressão diferencial*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007. Citado na página 31.
- 20 ATUAL, M. (Ed.). *Medidor de vazão mássica tipo coriolis de tubo Omega*. 2004. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1137-medidor-de-vazo-mssica-tipo-Coriolis-de-tubo-omega>>. Citado na página 34.
- 21 SERRA, U. *INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL*. 1. ed. Serra: CEFETES, 2006. 49 p. Citado na página 34.
- 22 BANDEIRA, A. F. C. *Otimização de um padrão gravimétrico de medição de caudal de fluidos entre 20 mL/ha 0,006 mL/he extensão da capacidade para 600 mL/h*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013. Citado na página 35.
- 23 4787, L. glassware I. *Volumetric instruments – Methods for testing of capacity and for use*. 2. ed. [S.l.], 2010. Citado na página 35.
- 24 INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. Citado na página 38.
- 25 AERONÁUTICA, I. Instituto Tecnológico de. *INTRODUÇÃO À TEORIA DE ERROS*. Disponível em: <<http://www.fis.ita.br/labfis24/erros/errostextos/erros2.htm>>. Citado na página 39.
- 26 LANA, C. R. de. *Metrologia -b: Erro sistemático, aleatório e incerteza total*. 2007. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/metrologia--b-erro-sistematico-aleatorio-e-incerteza-total.htm>>. Citado na página 40.
- 27 SAKURADA, E. Y. *As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. mathesis, 2001. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80128>>. Citado na página 41.
- 28 OLIVEIRA, L. R. de. *Medidas de massa: o estado da arte*. Disponível em: <http://cta.if.ufrgs.br/projects/instrumentacao-fisica/wiki/Medidas_de_massa_-_A_balancamento_eletronica>. Citado na página 45.
- 29 MOTION, M. *Remote Electronics Unit*. [S.l.], 1989. 79 p. Citado na página 78.