

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANDERSON DOS SANTOS PINHEIRO BRASIL**

**SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO DE GASES**  
**UTILIZANDO MICROCONTROLADOR ARDUINO**

**SANTOS/SP**

**2018**

**ANDERSON DOS SANTOS PINHEIRO BRASIL**

**SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO DE GASES  
UTILIZANDO MICROCONTROLADOR ARDUINO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof.<sup>o</sup> Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e do Prof.<sup>o</sup> Dr. Aldo Ramos Santos.

**SANTOS/SP  
2018**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Brasil, Anderson dos Santos Pinheiro.  
Sistema de calibração de medidores de  
vazão de gases utilizando microcontrolador arduino/  
Anderson dos Santos Pinheiro Brasil.- 2018.  
95 p.

Orientadores: Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.  
Dr. Aldo Ramos Santos

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,  
SP, 2018.

1. Calibração. 2. Medidor de vazão. 3. sensor  
4. Arduino. I. Moraes Júnior,  
Deovaldo de, orient. II. Santos, Aldo Ramos, coorient.  
III. Sistema de calibração de medidores  
de vazão de gases utilizando microcontrolador Arduino.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Valdir e Elisete, à minha esposa, Priscila, à minha filha Liz e à minha sogra Marlene por todo apoio e carinho durante esta etapa da minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço,

A Deus, por me dar forças e sabedoria em todos os momentos da vida.

Aos meus orientadores e professores, Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e Dr. Aldo Ramos Santos, por compartilhar seu conhecimento, disponibilizar o laboratório para a realização dos ensaios experimentais e correções do texto.

Aos técnicos do Laboratório de Operações Unitárias, Álvaro Luiz Moreira Conrado, Irineu Penha da Ressurreição, Vitor Dias de Paula e Volnei de Lemos, pela atenção e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos estagiários, Laila Matos Fraga, Mayara Lima dos Santos, Rafael Gonçalves Alexandre da Silva e Thaís Centamore de Oliveira, que dispuseram tempo e esforços para coleta dos dados experimentais.

Ao amigo, Cristiano Medina, pelas sugestões e contribuição com o Arduino.

Em especial a engenheira pesquisadora Cristina Shimabuku que mostrou uma direção nas minhas ideias e contribuiu para o aperfeiçoamento do texto.

## RESUMO

A vazão é uma grandeza de extrema importância nos processos industriais. O controle e a medição dessa variável ocorre ao longo de todas as etapas de manipulação de um fluido, pois permite otimizar o desempenho dos equipamentos e das operações. Quando o fluido em questão é compressível, a medição torna-se complexa, uma vez que a grandeza varia conforme a temperatura e a pressão. Atualmente existem diversos modelos de medidores de vazão de ar e gases que devem ser calibrados pelo fabricante e periodicamente volta-se a efetuar a calibração, garantindo a qualidade e precisão dos medidores. A verificação pode ser efetuada pelo fabricante, pelo usuário ou em um laboratório credenciado pela rede brasileira de calibração. Este trabalho teve por objetivo aperfeiçoar um sistema de calibração de medidores de vazão de gases utilizando o ar comprimido e o gás carbônico por método volumétrico com correção de pressão e temperatura. O sistema, presente no Laboratório de Operações Unitária da Universidade Santa Cecília, foi operado com um circuito formado por sensores, uma plataforma de prototipagem eletrônica denominada Arduino, um “display” e fontes de alimentação, com o intuito de substituir o uso do cronômetro e reduzir erros ocasionados por um operador. O sistema foi composto por uma torre com diâmetro interno de 83,7mm e comprimento de 1000mm para medida do volume de uma coluna de água deslocado pelo gás por unidade de tempo onde foram fixados os sensores de nível. Consistiu também de dois tanques com capacidade de 114 litros e 64 litros, um manômetro, duas válvulas de esfera, uma válvula de globo, uma válvula geral de alimentação de gás e uma de agulha, mangueira de polietileno de baixa densidade, tubos de PVC transparente, três rotâmetros e um medidor bolhometro. Nos rotâmetros estudados foram obtidos desvios de até 121% no medidor de vazão torre, porém o terceiro rotâmetro indicou um desvio inferior a 1% no ponto central da escala, confirmado por um medidor do tipo bolhometro. O sistema de calibração foi desenvolvido com os sensores capacitivos e a placa Arduino e permitiu quantificar com baixo custo de aquisição e operação a exatidão dos rotâmetros estudados.

Palavras-chave: calibração; medidor de vazão; sensor; Arduino;

## ABSTRACT

The flow is a greatness of extreme importance in industrial processes. The control and measurement of this variable occurs throughout all the stages of manipulation of a fluid, since it allows to optimize the performance of the equipment and the operations. When the fluid in question is compressible, the measurement becomes complex, since the magnitude varies with temperature and pressure. Currently there are several models of air and gas flow meters that must be calibrated by the manufacturer and periodically re-calibrates, ensuring the quality and accuracy of the meters. The verification can be carried out by the manufacturer, by the user or in a laboratory accredited by the Brazilian calibration network. The objective of this work was to improve a calibration system of gas flow meter using air and carbon dioxide by volumetric method with pressure and temperature correction . The system, present in the Unitary Operations Laboratory of Santa Cecília University, was operated with a sensor circuit, a prototyping platform Arduino, a "display" and power supplies, in order to replace the use of the stopwatch and reduce errors caused by an operator. The unit consisted of a tower with an internal diameter of 83.7 mm and a length of 1000 mm for measuring the volume of a column of water displaced by gas per unit of time where the level sensors were fixed. It also consisted of two tanks with a capacity of 114 liters and 64 liters, a pressure gauge, two ball valves, a globe valve, a general gas supply valve and a needle valve, low density polyethylene hose, PVC pipes, three rotameters and a bolhometer meter. In rotormeters studied deviations of up to 121% were obtained in the tower flowmeter, but the third rotameter indicated a deviation of less than 1% at the center point of the scale, as confirmed by a bolhometer meter. The calibration system was developed with the capacitive sensors and the Arduino board and allowed to quantify with low cost of acquisition and operation the accuracy of the studied rotameters.

Keywords: calibration; flow meter, sensor; Arduino;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubo de Pitot.....	3
Figura 2 - Tubo de Venturi .....	4
Figura 3 - Placa de Orifício do tipo concêntrico, excêntrico e segmental .....	5
Figura 4 - Rotâmetro .....	6
Figura 5 - Gasômetro .....	8
Figura 6 - Bocal sônico.....	9
Figura 7 - Sistema de Calibração de medidores de vazão.; .....	13
Figura 8 - Esboço do sistema de calibração de medidores de vazão de gases.....	15
Figura 9 - Rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min .....	16
Figura 10 - Rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h.....	16
Figura 11 - Rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min .....	17
Figura 12 - Dispositivo para teste do sensor de nível.....	18
Figura 13 - Sensor Capacitivo no medidor torre.....	19
Figura 14 - Constante dielétrica em função da distância real da comutação .....	20
Figura 15 - Distância( $S_n$ ) do sensor para o metal .....	21
Figura 16 - Arduino Uno .....	21
Figura 17 - Microcontroladora com <i>display</i> .....	22
Figura 18 - Circuito elétrico acoplado ao sistema de calibração .....	23
Figura 19 - Bolhometro.....	24
Figura 20 - Sensores capacitivos faceados a parede da torre .....	28
Figura 21 - Esquema, em vista lateral, do tanque principal com o tubo de acrílico vertical (torre) .....	30
Figura 22 - Dispersão do tempo nos testes com o sensor de nível reed switch.....	36
Figura 23 - Curva de calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3) operando com ar a 21°C e 760 mmHg no bolhometro.....	41
Figura 24 - Curva de Calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min (R1) operando com ar a 21°C e 760 mmHg.....	43
Figura 25 - Curva de calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h (R2) operando com ar a 32°C e 5149 mmHg.....	45
Figura 26 - Curva de calibração e erro do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3) operando com ar a 21°C e 760 mmHg.....	47
Figura 27 - Curva de calibração do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3) operando com dióxido de carbono no bolhometro .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela do tipo de material (constante dielétrica).....	20
Tabela 2 - Características elétricas do Arduino Uno .....	23
Tabela 3 - Tempo de escoamento utilizando sensor de nível .....	35
Tabela 4 - Comparação entre tempo registrado por cronômetro e a microcontroladora utilizando sensor capacitivo .....	37
Tabela 5 - Rotômetros.....	38
Tabela 6 - Planejamento dos ensaios .....	38
Tabela 7- Dimensões do bolhometro .....	40
Tabela 8 - Dimensões da torre do sistema de calibração .....	40
Tabela 9 - Operação com ar. Vazão obtida através do bolhometro (referência) e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). .....	41
Tabela 10 - Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min (R1). .....	42
Tabela 11 - Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h (R2). .....	44
Tabela 12 - Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). .....	46
Tabela 13 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através do bolhometro (referência) e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). .....	48
Tabela 14 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min (R1). .....	50
Tabela 15 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h (R2). .....	51
Tabela 16 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A - área da seção transversal do tubo
- CO<sub>2</sub> - gás carbônico; dióxido de carbono
- CPU - Unidade Central de Processamento
- D - diâmetro interno do tubo
- DCV - tensão contínua
- g - aceleração da gravidade
- h - altura do fluido no tubo
- IDE - Ambiente de desenvolvimento integrado
- K - valor que inclui os parâmetros do instrumento, a configuração física da instalação e as características físicas do fluido.
- LPM - litros por minuto
- M - massa molar
- op - operação
- P - pressão na superfície do líquido
- P<sub>atm</sub> - pressão atmosférica
- P<sub>m</sub> - pressão nas condições do ar indicada no medidor a ser calibrado
- PEBD - polietileno de baixa densidade
- POM - poliacetal
- PVC - Policloreto de Vinila
- Q - vazão volumétrica
- Q<sub>ref</sub> - vazão de referência ou padrão
- R - constante universal dos gases
- R1- rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min
- R2- rotâmetro com fundo de escala 60NL/h
- R3 - rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min
- RAM - Memória de acesso aleatório
- Sn - distância nominal de comutação
- Sr - distância real de comutação
- t - tempo de medição
- T<sub>m</sub> - temperatura nas condições do ar indicada no medidor a ser calibrado
- TQ - tanque

$v$  - velocidade média do fluido

$V$  - volume; válvula

$V_m$  - volume do ar acima do ponto desejado corrigido para as condições do medidor

$\Delta p$  - diferença de pressão

$\rho$  - massa específica; densidade

$\gamma$  - peso específico

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.1.1. Medidores de vazão .....	1
1.1.2. Calibração de medidores de vazão .....	8
1.1.3. Desempenho do instrumento .....	10
1.2. Objetivos .....	12
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
2.1. Sistema de calibração de medidores de vazão de gases .....	14
2.1.1. Montagem do protótipo .....	17
2.1.2. Sensores de nível .....	18
2.1.3. Sensores Capacitivos .....	19
2.1.4. Arduino .....	21
2.1.5. Bolhometro .....	24
2.2. Fundamentos Teóricos .....	25
2.3. Métodos .....	27
2.3.1. Seleção dos sensores para o sistema de calibração .....	27
2.3.2. Método de calibração dos medidores de vazão .....	28
2.3.3. Método de calibração no bolhometro .....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
3.1. Seleção do sensor .....	35
3.2. Validação do Método e Curva de Calibração .....	37
4. CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....	53
4.1. Conclusão .....	53
4.2. Sugestões .....	54
5. REFERÊNCIAS .....	75
6. APÊNDICE .....	77
8. ANEXO .....	81

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Generalidades

#### 1.1.1. Medidores de vazão

A vazão, uma das variáveis mais importantes de processos industriais, é definida como a quantidade de um produto, expressa em massa ou volume, que passa por determinado ponto de referência, em certa unidade de tempo. Sua medição está presente nas estações de tratamento e nas indústrias, seja ela química, petroquímica, alimentícia, mecânica ou farmacêutica.

Um dos pioneiros a contribuir com a medição de vazão foi Leonardo Da Vinci, no século XV. Suas observações hidráulicas permitiram que ele formulasse o princípio da continuidade, em que a velocidade do fluxo varia inversamente com a área da seção transversal de um fluido, como observado na equação 1 (ROUSE, 1983).

$$Q = v A \quad (1)$$

Sendo:

Q a vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

v a velocidade média do fluido (m/s);

A a área da seção transversal de um tubo (m<sup>2</sup>);

Séculos depois, no surgimento da indústria, percebeu-se que efetuar a medição da vazão e controlá-la é fundamental para otimizar o desempenho de operações e equipamentos que exigem vazões específicas. Presente em todas as etapas de um processo em que há o manuseio de um fluido, líquido ou gasoso, ela está associada diretamente no balanço de massa, interferindo na compra e venda dos produtos (DUNN, 2005).

Além dos fins contábeis, para Ribeiro (1999), a medição e o controle das vazões ao longo de todas as fases da manipulação do fluido permitem verificar o rendimento do processo. O mesmo, porém, considera complexa a medição devido às diferentes velocidades que o fluido pode mover-se e a possibilidade de aceleração, já que a maioria dos medidores industriais determinam a velocidade e deduzem a vazão volumétrica a partir da equação da continuidade.

A complexidade aumenta quando o fluido em questão é compressível. Os valores da pressão e da temperatura ao longo do processo devem ser observados pois não são constantes e variam em relação aos valores padrões de projeto, sendo necessária a realização de correções para obter a vazão volumétrica compensada.

Na seleção do instrumento de medição da vazão, a composição química, o estado físico, a pressão, a temperatura e a vazão a ser medida e/ou controlada são alguns dos fatores que devem ser levados em consideração em virtude das diversas condições de serviço (DELMÉE, 1999).

De acordo com Delmée (1999), o conjunto de medição pode ser dividido em duas partes: elemento primário e elemento secundário. O elemento primário tem como função transformar a vazão em outra grandeza facilmente mensurável. O elemento secundário, por sua vez, tem como função transformar essa grandeza em uma medida apropriada para leitura local ou para a transmissão, a distância do valor que corresponde à vazão. Esse elemento secundário pode ser um manômetro ou um transdutor de pressão diferencial, segundo Holland & Bragg (1995).

Foust et al (1982), afirmam que a operação da maioria dos medidores tem como base a equação de Bernoulli. Eles são projetados de modo que a queda de pressão, resultante da variação da energia cinética, do arraste, do atrito ou da combinação desses mecanismos, esteja em função da vazão.

Nos sistemas deprimogênios, amplamente utilizados, o medidor de vazão é quem causa essa diferença de pressão ao proporcionar o estreitamento no trajeto do fluxo para aumentar sua velocidade. A relação entre a diferença de pressão e a vazão está apresentada na equação 2.

$$Q = K \sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

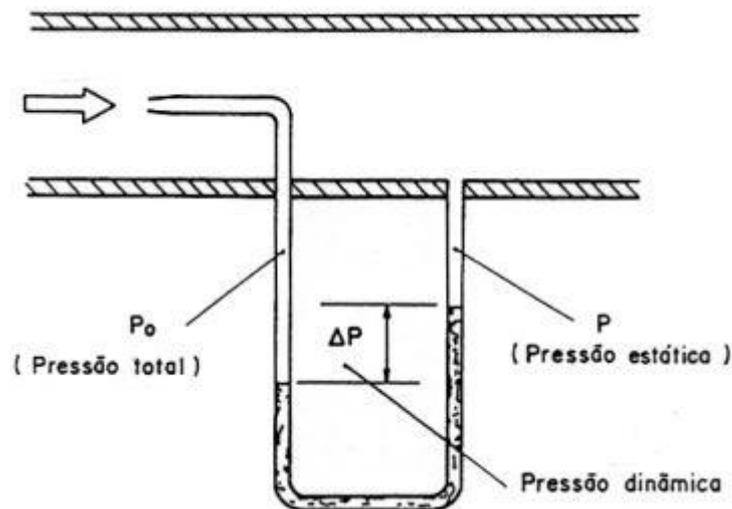
Sendo:

K o valor que inclui os parâmetros do instrumento, a configuração física da instalação e as características físicas do fluido;

$\Delta p$  a diferença de pressão (m); e

Q a vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

Um exemplo de elemento primário utilizado até os dias atuais é o tubo de Pitot, conforme apresentado na Figura 1. Desenvolvido por Henri Pitot no século XVIII, ele consiste em um tubo de impacto na direção do fluxo mas com sentido contrário ao escoamento e um tubo estático com abertura perpendicular à direção do fluxo. Ambos são ligados a um manômetro ou a qualquer outro sistema equivalente que meça pequenas diferenças de pressão. (MCCABE, SMITH & HARRIOT, 1991)



**Figura 1 - Tubo de Pitot**  
Fonte: SENAI (1999, p.12)

Através do tubo na direção do fluxo é possível obter a pressão total, enquanto o tubo com abertura perpendicular à direção do fluxo mede a pressão estática. A diferença entre essas medidas é denominada pressão dinâmica.

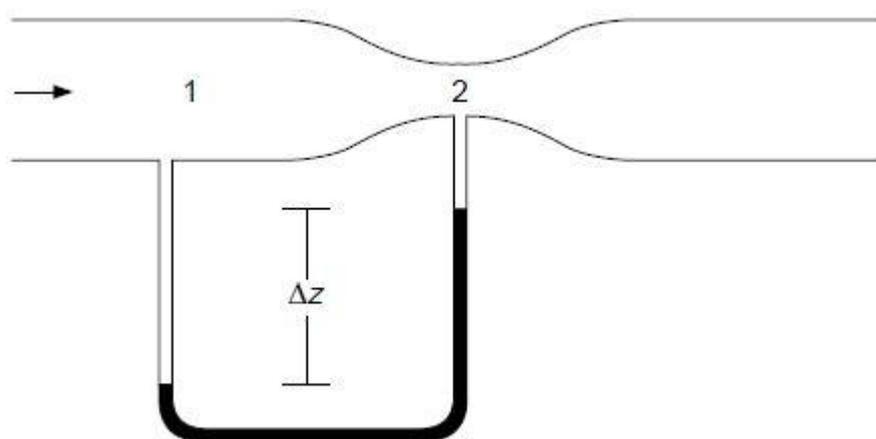
Por meio de equações, não abordadas no presente trabalho, que utilizam a pressão dinâmica, é possível obter a velocidade em apenas um ponto de uma corrente. Para obter a vazão, deve-se quantificar a velocidade em diversos pontos

de uma mesma seção de escoamento, seguido do tratamento dos resultados. A relação matemática para obter a vazão varia de acordo com o tipo de tubo usado.

Deve-se atentar para possíveis erros da pressão estática que dependem da velocidade e da viscosidade do fluido, bem como o fato de ele ser compressível ou incompressível. Outro ponto a ser considerado é a pequena diferença de pressão quando o fluido é um gás. (MCCABE, SMITH & HARRIOTT, 1991)

Diferentemente do tubo de Pitot, os tubos de Venturi e as placas de orifício são elementos primários que obtêm a velocidade média do fluido.

O tubo de Venturi consiste em uma seção curta de tubo entre duas seções cônicas concêntricas com a linha central do tubo, como observado na Figura 2.



**Figura 2 - Tubo de Venturi**

Fonte: Perry, Green & Maloney (1999, p.6-9)

A seção transversal do cone de entrada é reduzida com o intuito de aumentar a velocidade, ocasionando uma variação na pressão. Após a constrição, segundo McCabe, Smith & Harriot (1991), tem-se o cone de saída onde a velocidade do fluido é reduzida e parte da pressão original é recuperada. A parte de pressão recuperada está relacionada ao ângulo do cone. Inicialmente, os tubos de Venturi foram destinados para medição de água e efluentes em tubulações de grande porte, mas podem ser usados para outros gases e líquidos, incluindo os que contém sujeira.

De acordo com a CRANE (2010), apesar de ser tratados de forma genérica, os medidores Venturi podem ser divididos em três grupos conforme o seu método de fabricação:

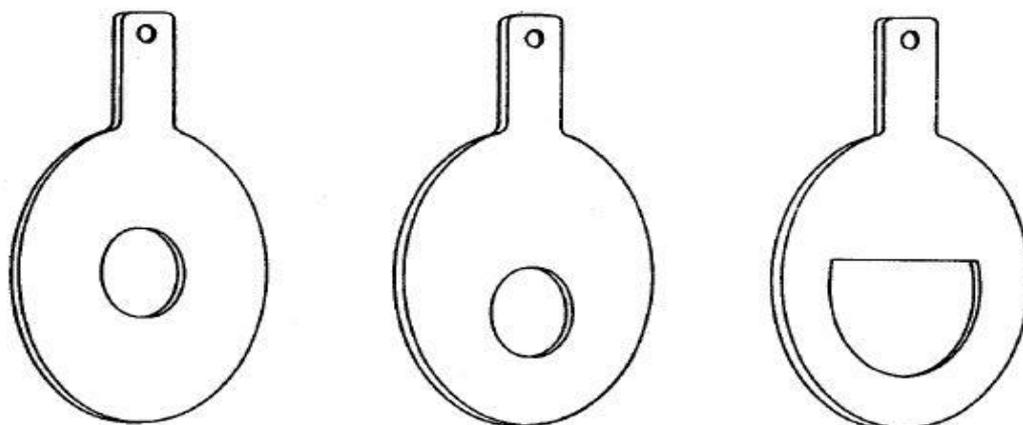
a. Medidor feito por fundição em um molde de areia. A garganta é usinada e as junções entre cilindros e cones são arredondados. Ele é usado em diâmetros de tubos entre 4 e 48 polegadas.

b. Medidor possui seção convergente usinada, bem como a entrada cilíndrica e a garganta. A junção entre os cilindros e os cones são arredondados. É usado em tubos de diâmetros entre 2 e 10 polegadas.

c. O medidor normalmente é fabricado por soldagem e usados em tubos de diâmetro que variam de 4 a 48 polegadas.

A precisão do tubo de Venturi para os três grupos, de acordo com Delmée (1999), é de 1,7% padrão e 0,75% calibrado. Porém, Ribeiro (1999) ressalta que eles são mais caros e possuem uma construção mais complexa comparadas à de uma placa de orifício. Outra desvantagem é o grande peso e as grandes dimensões em tubulações com grandes diâmetros.

A placa de orifício, Figura 3, consiste em uma placa circular plana e fina com uma abertura, que também permite relacionar o aumento da velocidade com a diminuição da pressão através da equação de Bernoulli. Na maioria das aplicações, o orifício é concêntrico com a placa e alinhada com o centro da tubulação, mas pode ser excêntrica ou segmentada. Ela é instalada entre dois flanges e com tomadas de pressão a montante e a jusante, para obter a diferença de pressão. (CRANE, 2010).



**Figura 3 - Placa de Orifício do tipo concêntrico, excêntrico e segmental**

Fonte: Delmée (1999, p.128)

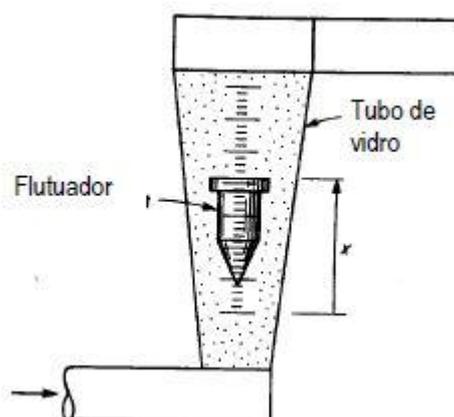
Recomenda-se instalar o instrumento em tubulações sem obstruções, válvulas e acessórios devido ao seu desempenho sensível sob algumas condições de fluxo, principalmente a montante. O comprimento desse tubo varia conforme acessórios e

dispositivos de condicionamento de fluxo, mas, para Schneider (2011), o comprimento de tubo reto a montante varia de 10 a 30 diâmetros de tubo.

Dentre os elementos primários com restrição, a placa de orifício é a mais usada. Aplicada na medição de vazão de líquidos limpos e de baixa viscosidade, da maioria dos gases e de vapor d'água de baixa velocidade, a placa de orifício tem perda de pressão relativamente grande, segundo PERRY, GREEN & MALONEY (1999). Já Delmée (1999), atribui uma precisão padrão que varia de 1,5 a 2,2%, dependendo do tipo de placa e uma calibração precisa de 0,75%.

Junto com os medidores de vazão por pressão diferencial, os medidores de área variável são muito populares. Inventado na Alemanha, ele possui o mesmo princípio implícito que os do tipo supracitado, porém a área de constrição é que varia conforme a vazão, permanecendo constante a diferença de pressão (PERRY, GREEN & MALONEY, 1999).

Apesar de ser considerado por Yoder (2012) como um termo genérico para todos os medidores de área variável, o rotâmetro consiste em um flutuador que se move livremente para cima e para baixo dentro de um tubo cônico na vertical, com sua menor extremidade para baixo, onde entra o fluido, conforme apresentado na Figura 4.



**Figura 4 - Rotâmetro**

Fonte: Ribeiro (1999, p. 13.7)

O fluido que entra no rotâmetro pelo extremo inferior do tubo cônico, passa pela área anular entre a parede do tubo e o flutuador, enquanto exerce uma força sobre a parte debaixo da peça móvel e sai pela extremidade superior.

Essa força sobre a parte inferior do flutuador é a soma da força de arraste, resultante do atrito e do arraste em torno dele, e do efeito de empuxo, que atua no

sentido de elevá-lo. No sentido contrário, atua uma terceira força, chamada de força gravitacional. Quando a soma das duas primeiras equivale a força gravitacional, o flutuador encontra-se na posição de equilíbrio dinâmico e torna possível a leitura da vazão.

O tubo cônico, normalmente de vidro ou polímero transparente, possui uma escala que permite que a posição da peça móvel indique a vazão. Em casos de fluido opaco, com características incompatíveis com o vidro ou polímero ou por qualquer motivo de segurança não permita a realização direta da vazão, o acoplamento de transmissores eletrônicos, pneumáticos ou de outros acessórios são permitidos.

Outras modificações não relacionadas ao acréscimo de acessórios ou ao material do instrumento são possíveis de acordo com sua aplicação. A geometria do flutuador pode variar conforme a necessidade do usuário (CAMPOS & CAMPOS, 1999).

Alterações que permitem a leitura em um painel central, não são interessantes, assim como utilizar o instrumento em instalações com diâmetro maior que 2 polegadas, pois aumentam o custo, segundo Foust et al (1982). Gomide (1999) afirma que outra desvantagem é a limitação da pressão de serviço, mas ele é amplamente utilizado em ambiente de pesquisas e laboratório devido à facilidade em instalá-lo e não necessitar de trechos de tubo reto antes ou após o medidor, como ocorre nos casos de medidores de área fixa. Ele também admite que a perda de carga é pequena, inferior a 5% da pressão a montante e permanece constante conforme a vazão aumenta. No entanto Perry, Green & Maloney (1999) garantem que o rotâmetro é satisfatório para gases e líquidos em alta e baixa pressão.

O rotâmetro para gases, segundo Ribeiro (1999), possui um baixo custo, a queda de pressão normalmente é inferior a 1 psig e sua precisão é razoável em vazões baixas e médias, tornando-se um instrumento de medição popular em laboratórios.

De acordo com Dunn (2005), frequentemente os rotâmetros devem ser calibrados, já que a precisão pode variar sobre a faixa de medição com a temperatura e a densidade do fluido, principalmente quando o fluido trata-se de um gás e ressalta-se que as empresas com melhores técnicas de medição são capazes de agregar mais qualidade aos produtos e aos processos.

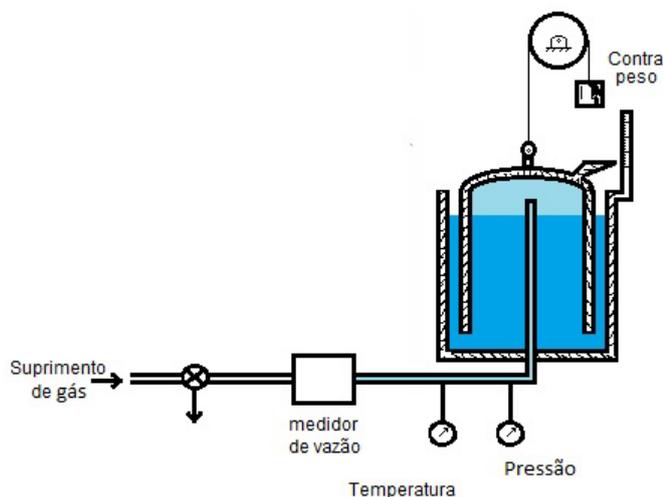
### 1.1.2. Calibração de medidores de vazão

A calibração consiste na verificação do desempenho do medidor. Ela é considerada confiável quando as medições são replicadas; os procedimentos são claros, objetivos e realizados por operadores com experiência e habilidade; e as variáveis, como temperatura e pressão, são conhecidas e até controladas (RIBEIRO, 1999). Deve ser realizada pelo fabricante e, ao longo da vida útil do instrumento, volta-se a verificar periodicamente se a calibração e os fatores definidos na fabricação permanecem os mesmos, garantindo a qualidade da medição.

Essa operação pode ser realizada pelo usuário ou externamente, em um laboratório credenciado da Rede Brasileira de Calibração, com padrões rastreados ou enviando para o fabricante, considerando o custo e a complexidade, já que envolvem simultaneamente padrões de massa e tempo ou volume e tempo.

Existem diversos métodos para calibração dos medidores de vazão que podem ser realizados no laboratório ou *in situ*.

Um dos métodos é o gasômetro. A calibração de medidores de vazão de gases pode ser feita com auxílio de um líquido conforme a Figura 5.



**Figura 5 - Gasômetro**

Fonte: Ribeiro (1999, p. 6.14)

Os gasômetros são amplamente utilizados como elemento primário para a medição volumétrica de gases em Institutos Nacionais de Medidas. Nele, o fluido atravessa o medidor de vazão por um intervalo de tempo e fica confinado na campânula. Como é possível observar na Figura 5, a campânula possui a parte

superior fechada e a parte inferior aberta. Conforme esta é preenchida com o gás, ela vai movimentando-se para cima. O volume do gás é obtido através do produto entre o deslocamento da campânula e a área da capela, enquanto o contrapeso mantém constante a pressão na campânula.

Muitos métodos de calibração que constituem elementos primários de vazão são trabalhosos e complexos para indicações de rotina. Então valores exatos podem ser transferidos para outros sistemas de medição de vazão por meio de uma cadeia de rastreabilidade. Ou seja, um elemento primário calibra um medidor padrão secundário que por sua vez calibra um medidor padrão de trabalho e finalmente calibra um medidor de vazão operacional (SANTOS, ZEFERINO & FRANÇA, 2006).

Dentre os medidores padrão calibrados com o elemento primário encontra-se o bocal sônico, Figura 6. Esse medidor apresenta a vantagem de não precisar de calibração com frequência devido à sua ótima estabilidade metrológica.



**Figura 6 - Bocal sônico**

Fonte: Ribeiro (1999, p. 6.14)

O bocal sônico gera uma pressão diferencial proporcional ao quadrado da vazão volumétrica, mas quando atinge certas condições, mantém constante a vazão do gás. O limite é quando a velocidade do gás se iguala a velocidade do som. A partir desse ponto, pode-se diminuir a pressão a jusante e a vazão permanecerá a mesma. (RIBEIRO, 1999)

Também é possível calibrar o medidor em um laboratório de vazão medindo o fluxo através de uma tubulação com grande precisão. Normalmente utiliza-se água e ar como fluidos de referência devido ao acervo de dados experimentais disponíveis.

Em geral, os fabricantes mantêm seus próprios laboratórios de vazão. Já os usuários que possuem o seu sistema de calibração, usa um medidor de referência

como padrão de comparação para outros medidores. A maioria dos laboratórios atuais usam computadores para receber os sinais dos sensores, calcular a vazão, documentar os resultados do medidor que está sendo calibrado e traçar as curvas de calibração.

### **1.1.3. Desempenho do instrumento**

No caso dos medidores de vazão, 100% destes instrumentos irão perder ao longo do tempo suas características de medição mencionadas no catálogo de referência ou manual do fabricante. Desta forma estes equipamentos devem necessariamente ser calibrados periodicamente para não comprometer a qualidade do processo industrial ao qual estão instalados. Através da metrologia, entendeu-se que as limitações dos métodos de medição e a diversidade de variáveis exercem influência no processo, não permitindo que a exatidão dos medidores de vazão sejam iguais aos de outras grandezas. Delmée (1999) sugere que as classes de exatidão dos medidores de vazão sejam delimitadas, considerando o Erro Máximo Admissível (EMA), que inclui erros de linearidade, repetibilidade e a histerese que é a resposta que o instrumento de medição apresenta quando este é estimulado no sentido de pressão crescente ou decrescente. A exatidão é definida como o grau de concordância entre o valor indicado no medidor e o valor considerado ideal ou padrão. Esse termo encontra-se ligado à calibração de instrumentos, já que o intuito do medidor é obter o valor real da vazão e a diferença entre os valores pode ser chamado de erro.

Outro termo normalmente ligado a calibração e erroneamente confundido com a exatidão é a precisão. A precisão é uma condição para a exatidão e pode ser definida como grau de concordância mútua e consistente entre várias medições individuais, relacionada à repetibilidade e à reprodutibilidade. Para um melhor entendimento, todo instrumento exato deve ser preciso e calibrado.

Quando a precisão de um instrumento é definido por um fabricante, ele está definindo um erro máximo quando o instrumento estiver sob condições determinadas. A precisão de todos os pontos é calculada teoricamente através da equação 3 e comparadas com um padrão (RIBEIRO, 1999).

$$\text{Precisão}_{\%} = \left| \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor verdadeiro}}{\text{valor verdadeiro}} \right| 100 \quad (3)$$

O valor medido é aquele transmitido pelo instrumento, enquanto o valor verdadeiro é obtido pela leitura do instrumento padrão ou obtida de maneira equivalente, com precisão superior àquela do medidor em questão.

A precisão pode ser expressa de duas maneiras: em porcentagem da escala inteira e em porcentagem do valor instantâneo. A relação dos valores mínimos e máximos lidos com mesma precisão na escala do medidor é chamado de rangeabilidade ou largura da faixa.(DELMÉE,1999)

A repetibilidade, habilidade relacionada a precisão, refere-se a capacidade do medidor em transmitir o mesmo dado em medições consecutivas nas mesmas condições, ou seja, os valores, o instrumento de medição, o método, o local e o observador devem ser o mesmo. Quanto maior a proximidade dos valores obtidos nas medições consecutivas, maior é a repetibilidade do instrumento.

Entretanto, apenas a repetibilidade não é o bastante para a precisão, então agrupa-se medições do mesmo valor sob condições diferentes, que expressa a reprodutibilidade. A reprodutibilidade ideal é aquela em que o desvio do instrumento é nulo, ou seja, a calibração do instrumento não se desvia gradativamente com o decorrer do tempo.

Outro erro recorrente é de linearidade, quando a medição do instrumento não está em conformidade com a linha reta da calibração, e a de histerese. Delmée (1999) define a linearidade como o erro máximo que uma característica se afasta de sua função linear e define o segundo erro como o desvio percentual máximo com o qual, para uma mesma vazão, uma indicação do valor instantâneo se afasta de outro.

Os erros são a diferença entre o valor verdadeiramente mensurado e o resultado da medição. Por mais que sejam realizadas correções e calibrações, os erros são inevitáveis. Como o valor real é desconhecido, o resultado da medição é uma estimativa dele e o grau de dúvida associada a ele é denominada incerteza (INMETRO, 2008).

A incerteza corresponde a uma faixa de dispersão ou intervalo e o erro é um valor pontual. O segundo pode ser corrigido, enquanto a incerteza é uma dúvida remanescente, um grau de desconhecimento sobre a medição da vazão. Ela pode ser proveniente da tendência errônea na leitura do instrumento analógico; dos valores inexatos dos padrões de medições e do material de referência; das aproximações ou suposições realizadas no procedimento de medição ou de seu método.

Pode-se analisar a incerteza com uma avaliação estatística de um conjunto de dados obtidos no ensaio ou na calibração, expressa como desvio padrão experimental da média ou buscando informações como dados de medições anteriores, certificado de calibração e especificações do fabricante.

Com o intuito de minimizar os erros na calibração dos medidores, preferem-se métodos automatizados, em que não seja necessária a presença de um operador.

## **1.2. Objetivos**

O presente trabalho teve por objetivo principal aperfeiçoar um sistema de calibração de medidores de vazão de gases por método volumétrico com correção de pressão e temperatura. Os objetivos secundários foram:

- a. Desenvolver um circuito eletrônico acessível, com uma placa Arduino microcontroladora, dois relés, dois sensores e duas fontes de alimentação e construir um código para registrar o tempo de variação do nível da água entre os dois sensores, em substituição ao uso do cronômetro por um operador.
- b. Calibrar três rotâmetros com escalas distintas e determinar os limites do sistema de calibração.
- c. Analisar o sistema de calibração utilizando o ar comprimido e o gás carbônico como gases para obter os dados de cada rotâmetro.
- d. Adicionar um medidor de vazão de gases tipo bolhometro utilizando como referência para validação do método do medidor torre.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Apresenta-se na Figura 7 um sistema de calibração de medidores de vazão de gases com a placa Arduino, o “display” e os sensores de nível.

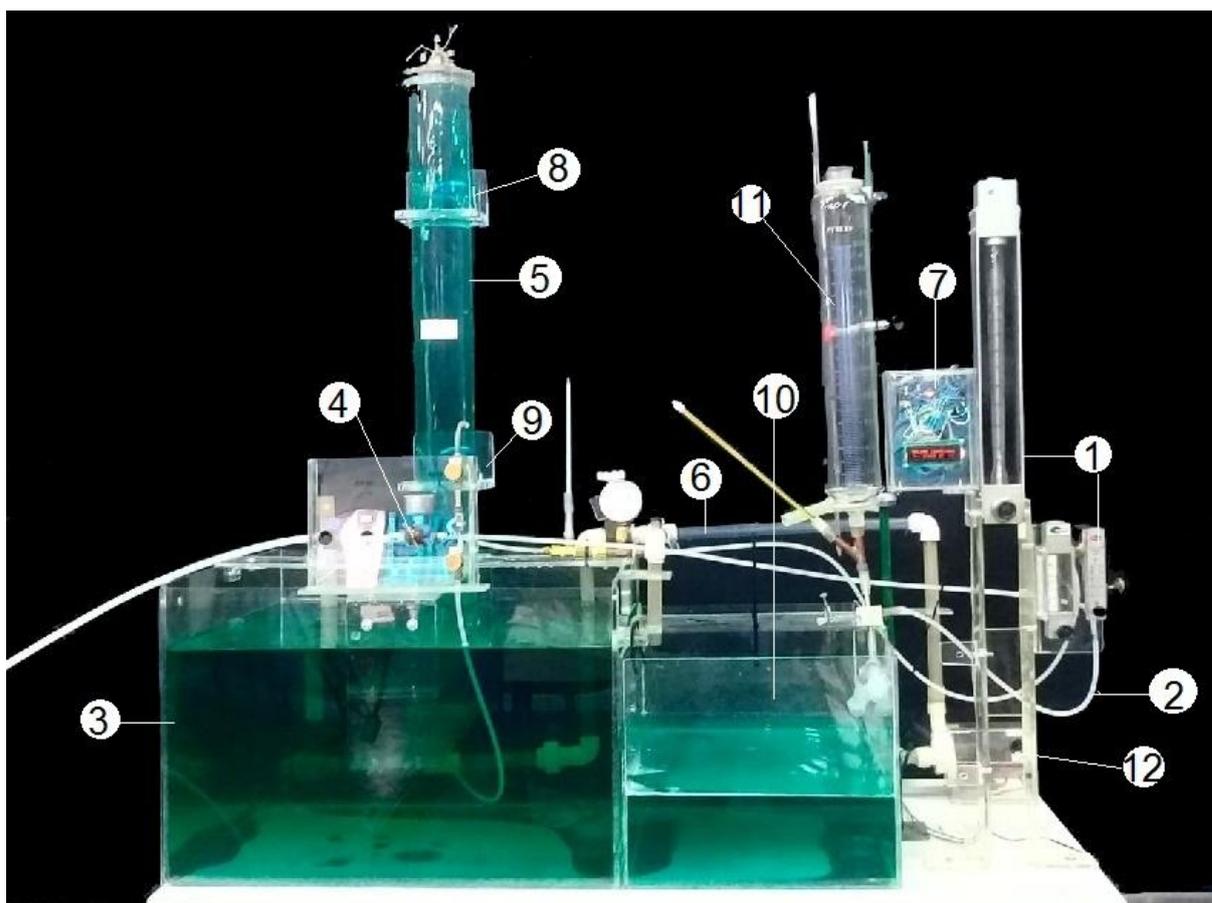


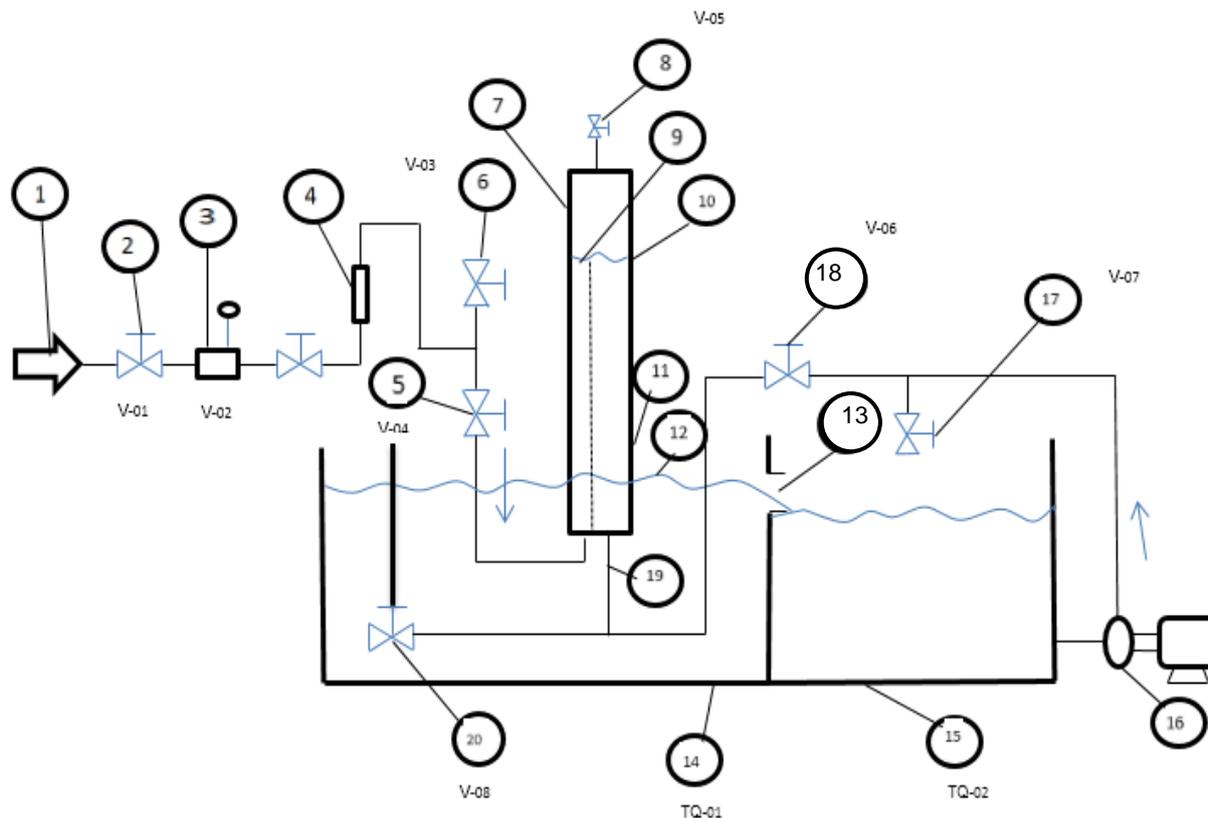
Figura 7 - Sistema de Calibração de medidores de vazão. 1) Rotâmetros; 2) Linha de ar; 3) Tanque principal (TQ-01); 4) Válvula reguladora de pressão com manômetro; 5) Tubo de acrílico vertical com dois sensores de nível; 6) Linha de água para preencher o tubo vertical de acrílico; 7) Arduino Uno com “display”; 8) Sensor de nível superior; 9) Sensor de nível inferior; 10) Tanque auxiliar (TQ-02); 11) Bolhometro; 12) Bomba centrífuga;

## 2.1. Sistema de calibração de medidores de vazão de gases

Apresenta-se na Figura 8 o esboço do sistema de calibração .

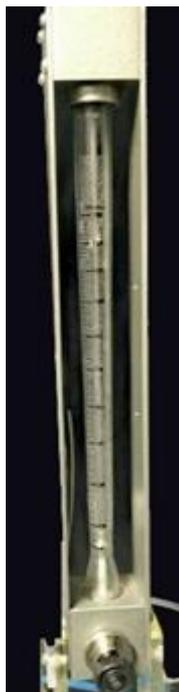
O sistema foi formado basicamente por:

- a. Um tanque de acrílico principal (TQ-01) com 400 mm de altura, 600 mm de largura, 610 mm de comprimento e um vertedor que impedia que o nível fique acima de 313 mm;
- b. Um tanque auxiliar (TQ-02) com 305 mm de altura, 600 mm de largura e 350 mm de comprimento;
- c. Um tubo de acrílico vertical com 1000 mm de altura, diâmetro interno médio de 83,7 mm e parede com 6 mm de espessura, usualmente chamado de torre;
- d. Uma bomba centrífuga INVENSYS com 34 W, 220V, instalada na saída do tanque auxiliar (TQ-02) para transportar a água para a torre;
- e. Um manômetro da marca WIKA com faixa de trabalho de 0 a 60 psi a montante do medidor de vazão acoplado a uma válvula reguladora de pressão.
- f. Uma válvula reguladora de pressão (V-02) com manômetro;
- g. Três válvulas de agulha para controlar o fluxo de ar. Duas encontravam-se a jusante do rotâmetro e operavam combinadas. Quando a válvula que controlava o fluxo para a torre (V-04) encontrava-se fechada, a válvula que controlava o fluxo para a atmosfera (V-03) ficava aberta ou o contrário. A terceira encontrava-se no topo da torre (V-05), despressurizando-a quando estava sendo preenchido por água;
- h. Uma válvula de globo (V-06) na que regulava o fluxo de água destinada para a torre;
- i. Três válvulas de esfera. A primeira (V-01) alimentava a entrada de ar na torre. A segunda (V-07) posicionada a jusante da bomba centrífuga que controlava o fluxo do reciclo. A terceira encontrava-se submersa (V-08) próxima à torre, impedindo que a água da torre escorre-se quando fechada;
- j. Tubos de PVC transparente de 1/2 polegada;
- k. Mangueira de PEBD-Polietileno de Baixa Densidade com diâmetro de 1/8 de polegada;



**Figura 8 - Esboço do sistema de calibração de medidores de vazão de gases. 1) entrada do ar ou gás; 2) válvula geral de alimentação de ar ou gás na unidade experimental; 3) válvula de regulagem fina da base do medidor a ser calibrado (rotâmetro); 4) rotâmetro; 5) válvula de alimentação da torre; 6) válvula para liberar o ar ou gás para atmosfera; 7) torre de calibração de acrílico transparente; 8) válvula de topo da coluna, aberta no preenchimento de água e fechada na operação de calibração com a entrada de ar ou gás; 9) nível de líquido na torre; 10) sensor de nível superior; 11) sensor de nível inferior; 12) nível constante de água no tanque principal mantido por vertedor; 13) vertedor; 14) tanque principal; 15) tanque auxiliar; 16) bomba centrífuga para preencher a torre de calibração; 17) válvula do reciclo da água para o tanque auxiliar; 18) válvula de alimentação de água da torre; 19) duto de entrada de água da torre; 20) válvula submersa com manopla acima do nível da água, fechada para a entrada de água na torre e aberta na operação de calibração.**

Iniciou-se os ensaios com o rotâmetro da Figura 9. O tubo de medição do rotâmetro era de vidro borossilicato e permitia a leitura de até 150 NL/min. A pressão e a temperatura de referência na calibração desse instrumento era de 760 mmHg e 21°C, respectivamente.



**Figura 9 - Rotômetro com fundo de escala 150 NL/min**

Em seguida, um rotômetro com fundo de escala 60 NL/h, presente na Figura 10, foi inserido ao sistema para continuidade do estudo. O tubo de medição era constituído de vidro borosilicada e a pressão e a temperatura de calibração deste instrumento era de 7 Kgf/cm<sup>2</sup> e 32 °C, respectivamente.



**Figura 10 - Rotômetro com fundo de escala 60 NL/h**

Por fim, foi adicionado o rotâmetro presente na Figura 11. O medidor, moldado em policarbonato, possuía uma válvula para ajuste da vazão com precisão e apresentava faixa de vazão de 2 a 25 LPM. O fabricante afirma que esse modelo fornece uma precisão de até 4% do fundo de escala e foi calibrado no padrão Standard, tendo como referência temperatura de 530 R (21 °C) e pressão de 14,7 psia (760 mmHg).



**Figura 11 - Rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min**

Para o aperfeiçoamento do sistema de calibração foi inserido um medidor do tipo bolhometro como referência e um circuito eletrônico que substituísse o uso do cronômetro por um operador, ambos apresentados na Figura 7. Entretanto, para a construção do circuito eletrônico foi necessário definir o sensor a ser utilizado com o auxílio de um protótipo.

### **2.1.1. Montagem do protótipo**

Na elaboração do circuito eletrônico foi construído um protótipo, exibido na Figura 12, que auxiliasse na escolha dos sensores. Nesse dispositivo foram testados os sensores de nível *reed switch*, evitando modificações desnecessárias na torre.



**Figura 12 - Dispositivo para teste do sensor de nível**

O protótipo era um tubo cilíndrico de plástico com capacidade de 1,8 litros e 36 centímetros de altura com local para instalação dos sensores de nível. O sensor inferior foi instalado a 8 centímetros do fundo do tubo e o sensor superior encontrava-se a 22 centímetros acima do sensor inferior apenas para fixar uma distância entre eles, ambos conectados a um microcontrolador Arduino e a uma fonte de alimentação de 0~24DCV.

### **2.1.2. Sensores de nível**

O sensor de nível comumente chamado de chave de nível é classificado como mecânico por possuir uma chave *reed switch* que abre ou fecha quando detecta a presença de água com um flutuador magnético (WENDLING, 2010).

Os sensores, feitos de poliacetal (POM), trabalham em uma potência de, aproximadamente, 20 W, que gera corrente suficiente para sinalização na placa microcontroladora Arduino que foi escolhida por ter como vantagem o baixo custo, facilidade na reposição de peças e ser uma ótima ferramenta para realizar testes em unidades experimentais (WEG).

### 2.1.3. Sensores Capacitivos

A segunda opção de sensor para o circuito eletrônico era do tipo capacitivo. Os sensores capacitivos metálicos com rosca e faceados da marca JINJING modelo LJC18A3-H-ZIBY, Figura 13, são compostos por uma placa sensível, um oscilador, um circuito detector, um circuito *trigger* e um circuito de comutação.

O modelo do sensor capacitivo escolhido tem como característica técnica uma corrente máxima de comutação de 400 mA e corrente de consumo de 15 mA; trabalha numa faixa de temperatura de 0 a 50°C; possui proteção contra inversão de polaridade, picos reversos na carga, sobrecarga e curto circuitos nas saídas; a tensão de alimentação é de 10 a 30 DCV; e a função de saída é normalmente aberto (NA), configuração PNP onde o sinal de saída do sensor capacitivo é positivo.



Figura 13 - Sensor Capacitivo no medidor torre

Seu funcionamento baseia-se na alteração da frequência de oscilação de um circuito ressonante com a variação do valor da capacitância que ocorre entre a placa sensível e o ambiente sob aproximação da água. Esta mudança da frequência é enviada ao circuito detector onde é transformado em tensão. A tensão é recebida no

*trigger* e transformado em onda quadrada para excitar o circuito de comutação, bastando para acionar outros circuitos (WEG).

Esse tipo de sensor tornou-se uma das opções por ser amplamente utilizado no controle de nível de água, um ótimo atuador, como pode ser observado na Tabela 1 e Figura 14. É possível perceber que a constante dielétrica da água é igual a oitenta para uma distância real da comutação ( $S_r$ ) de 100%, ou seja, a distância real e a distância nominal de comutação ( $S_n$ ) são equivalentes para a água.

Tabela 1 - Tabela do tipo de material (constante dielétrica)	
Material	Constante Dielétrica( $\epsilon_r$ )
Álcool	25,8
Vidro	5,0
Papel	2,3
Petróleo	2,2
Porcelana	4,4
Teflon	2,0
Água	80,0

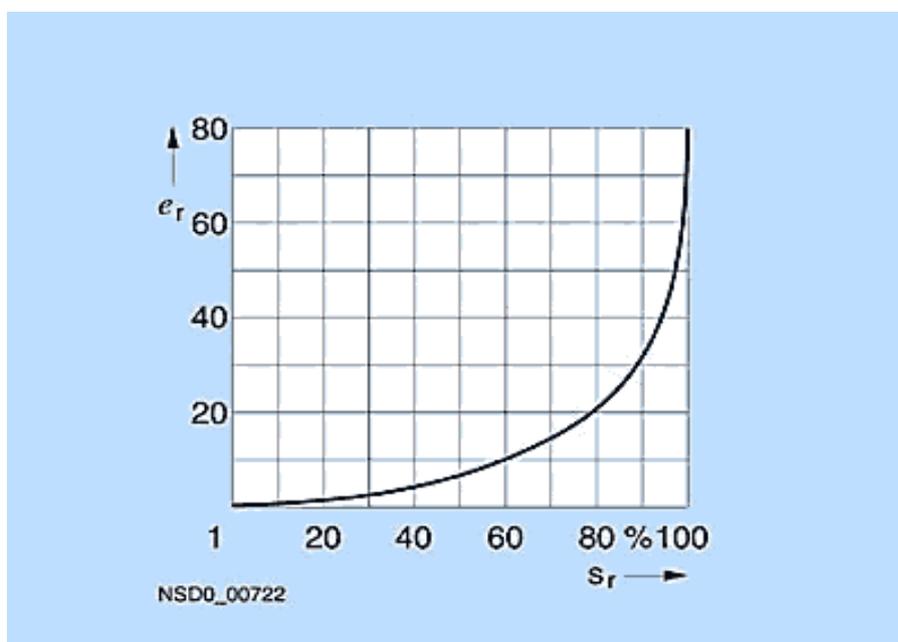
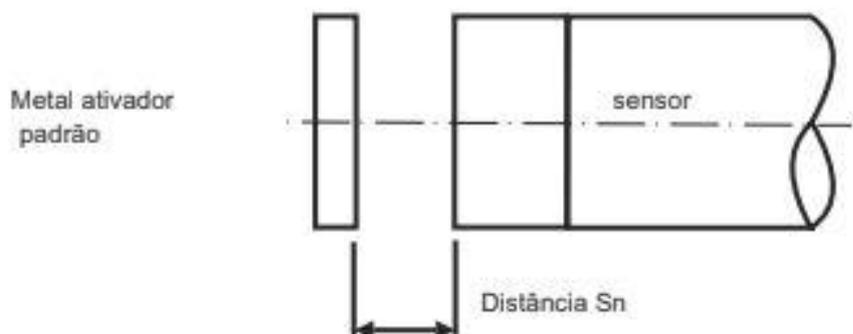


Figura 14 - Constante dielétrica em função da distância real da comutação  
Fonte: Control - Tec

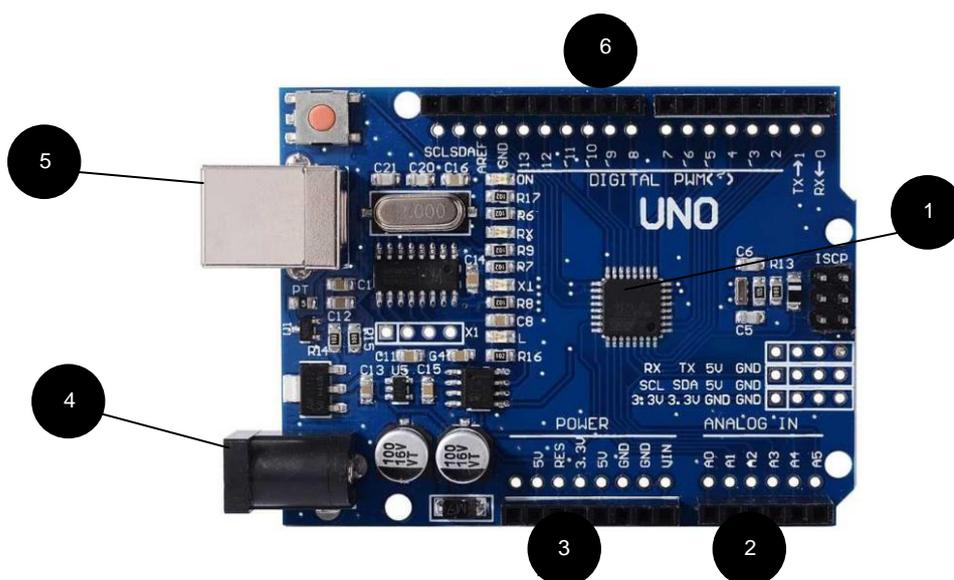
A distância nominal de comutação do sensor, apresentada na Figura 15, é de 10 mm e representa a distância de comutação determinada em condições normais de temperatura e tensão (WEG).



**Figura 15 - Distância(  $S_n$ ) do sensor para o metal**  
Fonte: Weg

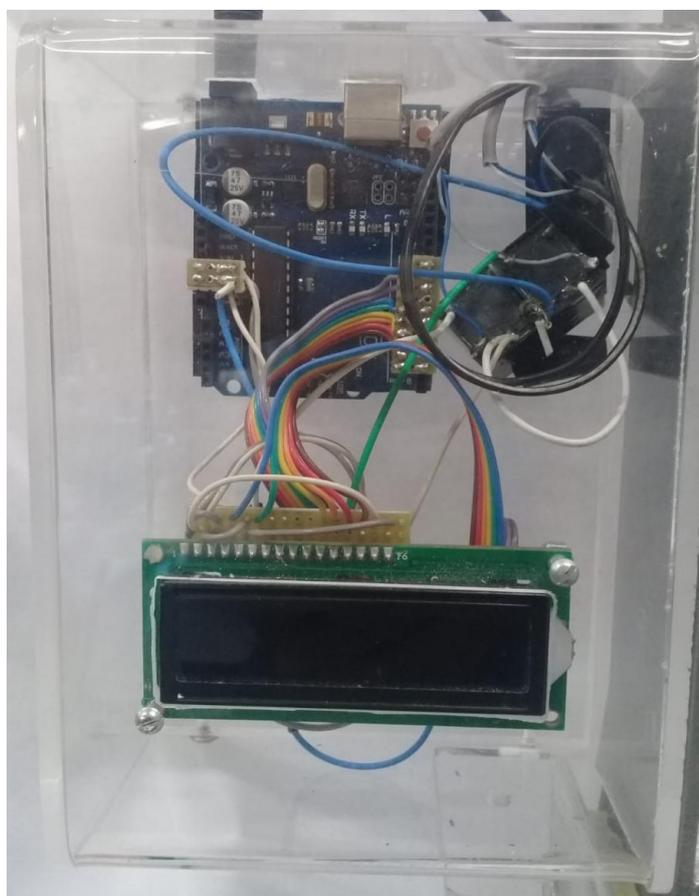
#### 2.1.4. Arduino

Após seleção dos sensores, eles foram ligados aos pinos I/O de uma placa microcontroladora da família Arduino Uno, representada na Figura 16.



**Figura 16 - Arduino Uno. 1) Microcontrolador ATmega 328; 2) Entradas Analógicas; 3) Pinos de tensão e terra; 4) Conector fêmea 2,1 mm com centro positivo; 5) Conector USB para cabo tipo AB; 6) Pinos de entrada e saída digital**

A plataforma de desenvolvimento Arduino é formada por um computador completo, no qual sistemas digitais ligados aos sensores são capazes de medir variáveis no ambiente físico. Além dos pinos I/O, ela é composta por CPU (Unidade central de processamento), memória flash e RAM (Memória de acesso aleatório). O Arduino foi programado de forma simples, com uma linguagem compreensível e ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) baseado em *Processing*, utilizando uma linguagem própria de código aberto, que permitiu que o tempo de variação do nível da água entre os sensores fosse registrado (MCROBERTS, 2015). O valor registrado em milissegundos foi exibido em um *display* acoplado à placa, apresentado na Figura 17, e o código do Arduino encontra-se no Apêndice A.



**Figura 17 - Microcontroladora com *display***

As características elétricas do Arduino encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Características elétricas do Arduino Uno

Microcontrolador	ATmega 328
Tensão de funcionamento	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V
Digital pinos I/O	14 (6 PWM)
Entrada Analógica Pinos	6
DC Current per I/O Pin	4 mA
Corrente DC para PIN 3.3 V	50 mA
Memória Flash	32 KB (0,5 KB boot loader)
SRAM	2 KB (ATmega 328)
EEPROM	1 KB (ATmega 328)
Velocidade do clock	16 MHz

O circuito eletrônico do Arduino foi desenvolvido conforme diagrama da Figura 18.

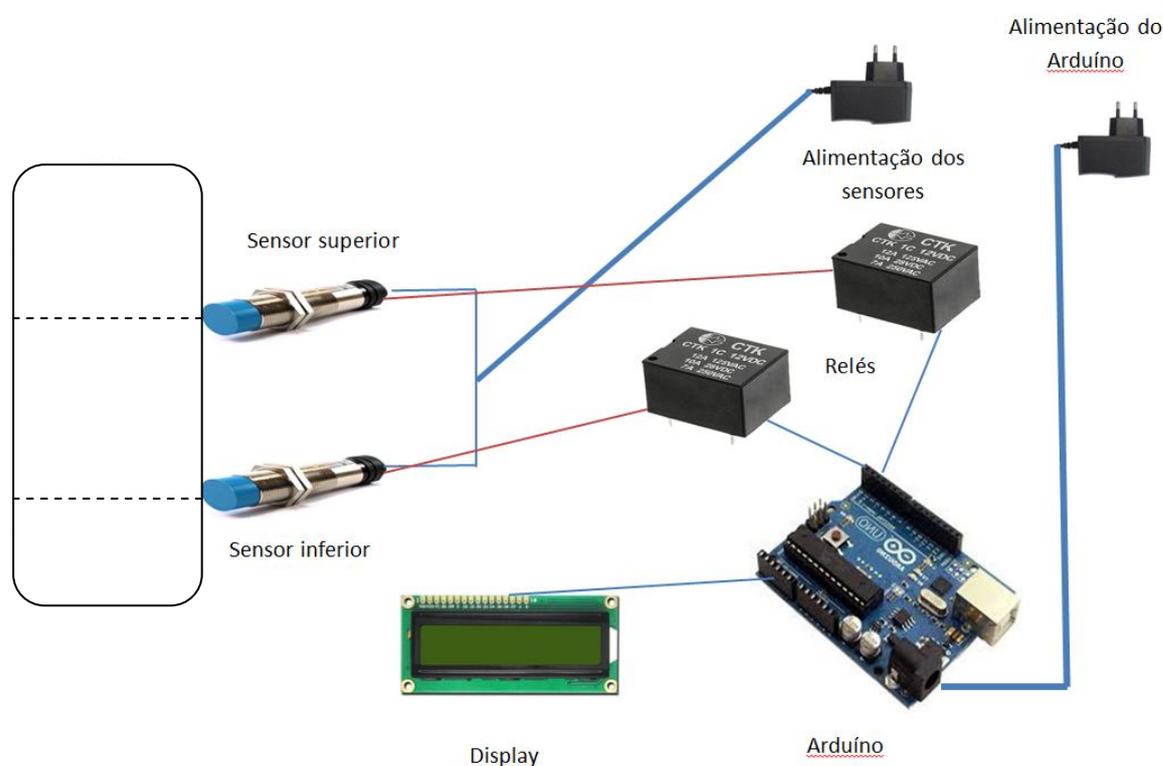


Figura 18 - Circuito elétrico acoplado ao sistema de calibração

### 2.1.5. Bolhometro

Outro aprimoramento do sistema de calibração foi o acréscimo do medidor de vazão de gases do tipo bolhometro como referência para os dados obtidos no medidor torre.

De acordo com Campos & Campos (1999), esse medidor é utilizado como padrão primário para calibrar outros medidores de pequena vazão de amostragem por causa da sua boa precisão.

O bolhometro, observado na Figura 19, consistia em uma bureta com capacidade de 2000 mL com uma conexão na sua extremidade inferior que permitiu acoplar o rotâmetro. Para a formação das bolhas foi utilizado uma seringa que funcionava como um bomba injetando uma solução aquosa.



Figura 19 - Bolhometro

## 2.2. Fundamentos Teóricos

O método de calibração dos medidores de vazão consiste no confronto entre a vazão de leitura no medidor e a vazão do sistema de calibração. Para a obtenção desta vazão foram necessários alguns conhecimentos: cálculo do volume em um tubo, Lei de Stevin e Lei dos Gases ideais.

O volume em um tubo vertical foi obtido através da equação 4.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} h \quad (4)$$

Sendo,

V o volume (m<sup>3</sup>);

D o diâmetro interno do tubo (m);

h a altura do fluido no tubo (m);

Obtido o volume no nível dos sensores, ele deve ser corrigido para os padrões de calibração do instrumento de medição. Para tal foi determinada a pressão na superfície da água no interior do tubo vertical através da Lei de Stevin na equação 5.

$$P - P_{atm} = \rho g h = \gamma h \quad (5)$$

Sendo,

P a pressão na superfície do líquido (Pa);

P<sub>atm</sub> a pressão atmosférica (Pa);

ρ a densidade do líquido (kg/m<sup>3</sup>);

g a aceleração da gravidade ( m/s<sup>2</sup>);

γ o peso específico kg/(m<sup>2</sup>s<sup>2</sup> ou N/m<sup>3</sup>); e

h a distância abaixo da superfície do líquido que deseja-se obter a pressão (m);

A pressão na superfície do líquido é igual ao do ar ou do gás que encontra-se acima dele no tubo. Conhecendo-se o valor desta variável, a temperatura e o

volume, é possível corrigir a vazão ou o próprio volume para as condições padrão de calibração do medidor.

O ar comprimido, assim como um gás submetido à baixa pressão, é considerado um gás ideal. Nesta condição, é possível realizar a correção através da Lei dos gases ideais. (RIBEIRO,1999).

Não alterando o número de mols, pode-se dizer que a relação entre pressão, temperatura e volume é constante, independente do processo. Modificando o estado, a relação é a mesma, equação 6.

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (6)$$

Em que

$P_0$ ,  $V_0$  e  $T_0$  são pressão absoluta (Pa), volume ( $m^3$ ) e temperatura absoluta (K) em um estado;

$P_1$ ,  $V_1$  e  $T_1$  são pressão absoluta (Pa), volume ( $m^3$ ) e temperatura absoluta (K) em uma condição diferente;

Como a equação 6 não apresenta a constante universal dos gases perfeitos, pode-se usar qualquer unidade, desde que seja consistente nos dois lados.

As vazões obtidas em ensaios com fluidos gasosos diferentes do ar comprimido devem ser corrigidas através de cálculos que ainda não foram mencionados. Para tal, necessitou-se calcular a densidade do fluido nas condições de operação e do ar comprimido nas condições de referência do medidor através da lei dos gases ideais empregando a constante universal dos gases perfeito, como observado na equação 7.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (7)$$

Sendo:

$\rho$  a densidade do gás ( $Kg/m^3$ );

$P$  a pressão do gás (bar);

$M$  a massa molar (  $Kg/mol$ );

R a constante universal dos gases ( $R=83,143 \cdot 10^{-6}$  bar m<sup>3</sup>/( mol K), obtida na tabela do Anexo C); e

T a temperatura absoluta do gás (K);

Em posse dos valores das densidades dos fluidos, a vazão de leitura no rotâmetro calibrado com ar correspondente a vazão real do fluido foi obtida através da equação 8 fornecida por Delmée (2014).

$$Q_{\text{leitura rot}} = Q_{\text{operação}} \left( \frac{\rho_{\text{operação}}}{\rho_{\text{ref. rot.}}} \right)^{0,5} \quad (8)$$

Sendo,

$Q_{\text{operação}}$  a vazão real do gás de operação (L/min ou L/h);

$Q_{\text{leitura rot}}$  a vazão de leitura no rotâmetro calibrado com ar correspondente à vazão real do gás de operação (L/min ou L/h);

$\rho_{\text{operação}}$  a densidade do gás de operação com temperatura e pressão nas condições do ensaio (Kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{\text{ref. rot.}}$  a densidade do ar nas condições padrão de calibração do rotâmetro (Kg/m<sup>3</sup>);

As equações 4, 6, 7 e 8 também foram utilizadas na determinação das vazões obtidas no medidor bolhometro (referência), sendo que o volume neste medidor é referente ao intervalo em que deseja-se cronometrar o tempo em que a bolha percorre um determinado volume na bureta, preestabelecido.

## 2.3. Métodos

### 2.3.1. Seleção dos sensores para o sistema de calibração

A confecção do protótipo da Figura 12 foi necessária para auxiliar a seleção do melhor tipo de sensor a ser utilizado. Para testar o sensor de nível *reed switch*, abasteceu-se o protótipo com água e abriu-se uma válvula ao fundo. Quando a água

atingiu o nível do sensor superior, a medição do tempo iniciou-se e a medição somente foi interrompida quando o nível desta atingiu o sensor inferior. O tempo de escoamento da água entre os níveis dos sensores foi registrado pelo Arduino e apresentado no *display*, em milissegundos. Os ensaios foram repetidos e os tempos de escoamento da água foram comparados, uma vez que a vazão era a mesma.

Os sensores capacitivos, observados na Figura 20, apresentam-se faceados a parede da torre, permitindo realizar testes no próprio medidor. O tempo de escoamento da água na torre, diferentemente do protótipo, pode ser influenciado pelo operador quando este não abre totalmente a válvula V-08. Então o tempo de escoamento da água entre os sensores foi cronometrado por dois operadores e registrado pela placa microcontroladora e posteriormente comparados.

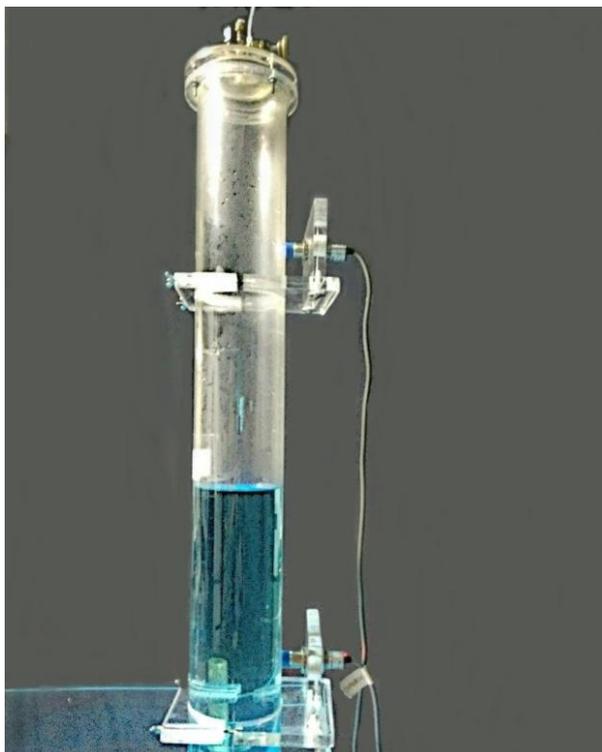


Figura 20 - Sensores capacitivos faceados a parede da torre

### 2.3.2. Método de calibração dos medidores de vazão

O método de calibração do medidor de vazão de gases apresentado na Figura 8 consiste na medição do volume do fluxo gasoso com o deslocamento do nível da

água cronometrado e foram utilizados o ar comprimido e o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) para a calibração dos medidores. Preliminarmente, a bomba, a fonte de alimentação dos sensores e a placa microcontroladora foram ligadas à energia elétrica. A torre foi preenchida com água, fechando a válvula de esfera V-08, abrindo as válvulas de globo V-06, agulha V-05 e de esfera V-07 e ligando a bomba centrífuga. Durante o preenchimento da torre, foi observado que a palavra "enchendo" aparecia no "display" conectado a placa Arduino, confirmando o funcionamento do circuito eletrônico.

Após a torre ser carregada, a válvula agulha V-05 foi fechada e a bomba desligada. Então abriu-se a válvula V-01 e regulou-se a pressão do gás através da válvula reguladora V-02 e verificou-se se a válvula agulha V-03 estava aberta. A vazão no rotâmetro foi ajustada e simultaneamente a válvula de agulha V-03 foi fechado e a V-04 aberta, seguidas da abertura da válvula de esfera V-08, permitindo que o volume de água fosse substituída pelo gás.

Conforme o nível da água descia e atingia o nível do sensor superior, foi possível determinar o volume e a pressão do gás, com o auxílio da equação 9 e 10, respectivamente, e iniciou-se a medição do tempo.

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (9)$$

$$P_1 = P_B - \rho g(J + H) \quad (10)$$

Sendo:

$V_1$  o volume do gás acima do ponto do sensor superior na condição experimental (m<sup>3</sup>);

$D$  o diâmetro interno da torre de acrílico transparente (m);

$L$  a altura entre o sensor superior e o topo da torre (m);

$P_1$  a pressão no nível do líquido, no sensor superior (Pa);

$P_B$  a pressão no ponto B, como observado na Figura 21, e de mesmo valor que a pressão atmosférica (Pa);

$\rho$  a massa específica da água, obtida na tabela do Anexo A (kg/m<sup>3</sup>);

$g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$J$  a distância entre o nível da água no tanque e o sensor inferior (m);

H a altura entre os sensores (m);

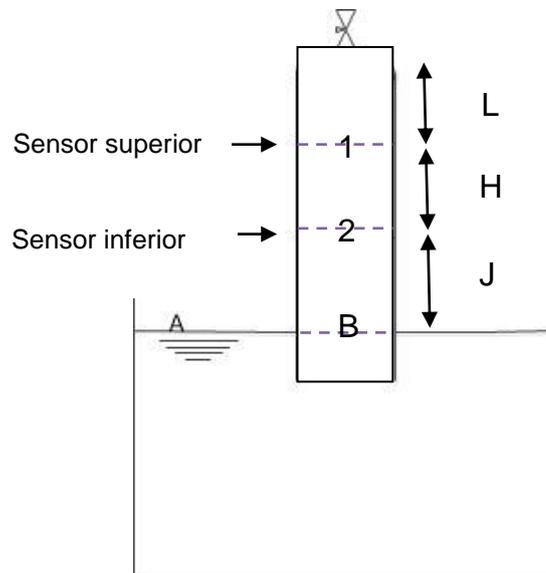


Figura 21 - Esquema, em vista lateral, do tanque principal com o tubo de acrílico vertical (torre)

Quando o nível da água igualou-se ao nível do sensor inferior, a medição foi pausada e o volume do gás e a pressão foram calculados (equação 11 e 12).

$$V_2 = \frac{\pi D^2}{4} (L + H) \quad (11)$$

$$P_2 = P_B - \rho g J \quad (12)$$

Sendo:

$V_2$  o volume do ar acima do ponto do sensor inferior na condição experimental ( $m^3$ );

$P_2$  a pressão no nível do líquido, no sensor inferior (Pa);

A medição do tempo foi realizada pela placa microcontroladora e por dois cronômetros simultaneamente. Após o registro do tempo, a válvula V-03 foi aberta ao mesmo tempo em que a válvula V-04 foi fechada. Imediatamente, a válvula V-05 foi aberta e a válvula V-08 fechada, deixando o sistema de calibração em condições para iniciar outro ensaio.

Como o volume dos gases varia de acordo com a pressão e a temperatura, o volume do ar nos pontos supracitados devem ser corrigidos pela equação 13.

$$V_m = \frac{V P T_m}{T P_m} \quad (13)$$

Sendo,

$V_m$  o volume do ar comprimido ou do dióxido de carbono acima do ponto desejado corrigido para as condições do medidor ( $m^3$ );

$V$  o volume do ar comprimido ou dióxido de carbono acima do ponto desejado nas condições do experimento ( $m^3$ );

$P$  a pressão no nível da água, seja no sensor inferior ou superior (Pa);

$T$  a temperatura do ar (K);

$T_m$  a temperatura nas condições do ar indicada no medidor a ser calibrado (K); e

$P_m$  a pressão nas condições do ar indicada no medidor a ser calibrado (Pa);

Uma vez que o volume entre os sensores e o tempo dispendido pela água se deslocar entre eles são conhecidos, foi possível calcular a vazão volumétrica nas condições do medidor (equação 14).

$$Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}} \quad (14)$$

Sendo,

$Q_m$  a vazão volumétrica do ar comprimido ou do dióxido de carbono nas condições do medidor ( $m^3/s$ , posteriormente convertido para L/min ou L/h);

$V_{2m}$  o volume do ar ou dióxido de carbono acima do nível do sensor inferior corrigido para as condições do medidor ( $m^3$ );

$V_{1m}$  o volume do ar ou dióxido de carbono acima do nível do sensor superior corrigido para as condições do medidor ( $m^3$ );

$t_{1 \rightarrow 2}$  o tempo do nível da água se deslocar entre os sensores (s);

Após determinar a vazão volumétrica do dióxido de carbono nas condições de temperatura e pressão de calibração do medidor ( $Q_m$ ), foi determinada a vazão de leitura do rotâmetro calibrado com ar pela equação 15.

$$Q_{\text{leitura rot (ref ar)}} = Q_{\text{CO}_2\text{operação}} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2\text{operação}}}{\rho_{\text{ar ref rot}}} \right)^{0,5} \quad (15)$$

Sendo:

$Q_{\text{leitura rot (ref ar)}}$  a vazão de leitura do rotâmetro calibrado com ar nas condições padrão de calibração correspondente a vazão do gás de operação (L/min ou L/h);

$Q_{\text{CO}_2\text{operação}}$  a vazão real do dióxido de carbono obtida no medidor (L/min ou L/h);

$\rho_{\text{CO}_2\text{operação}}$  a densidade do dióxido de carbono nas condições do ensaio (Kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{\text{ar ref rot}}$  a densidade do ar nas condições de calibração do rotâmetro (Kg/m<sup>3</sup>);

A densidade do CO<sub>2</sub> na operação e do ar nas condições de referência para calibração foram calculadas pelas equações 16 e 17, respectivamente.

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} \quad (16)$$

$$\rho_{\text{ar ref rot}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} \quad (17)$$

Sendo:

$\rho_{\text{CO}_2}$  a densidade do dióxido de carbono a temperatura e pressão de operação (Kg/m<sup>3</sup>);

$P_{\text{CO}_2}$  a pressão do dióxido de carbono (bar);

$M_{\text{CO}_2}$  massa molar do dióxido de carbono (Kg/mol);

$R$  a constante universal dos gases ( $R=83,143 \cdot 10^{-6}$  bar m<sup>3</sup>/(mol K), obtida na tabela do Anexo C);

$T_{\text{CO}_2}$  a temperatura do dióxido de carbono (K);

$\rho_{\text{ar ref rot}}$  a densidade do ar na temperatura e pressão de referência para calibração (Kg/m<sup>3</sup>);

$P_{\text{ar}}$  a pressão do ar nas condições de referência para calibração do rotâmetro (bar);

$M_{\text{ar}}$  a massa molar do ar (Kg/mol);

$T_{\text{ar}}$  a temperatura do ar nas condições de referência para calibração do rotâmetro (K);

### 2.3.3. Método de calibração no bolhometro

O medidor de vazão de gases tipo bolhometro é muito utilizado em unidades experimentais, mas no presente estudo, as vazões apresentadas serviram de referência para corroborar os resultados apresentados pelo medidor torre.

Antes de iniciar os ensaios, a bureta foi ambientada com detergente e uma solução aquosa 75% detergente foi preparada e adicionada à seringa. Essa seringa e o rotâmetro foram devidamente conectados à extremidade inferior da bureta, próximos ao termômetro. A vazão foi ajustada no rotâmetro e a solução presente na seringa foi bombeada para a bureta, iniciando a produção de bolha. Definiu-se dois pontos da bureta. O tempo que a bolha levou para percorrer de um ponto a outro foi cronometrado e o volume correspondente a essa altura foi obtida através da equação 18.

$$V_b = \frac{\pi D_i^2}{4} h \quad (18)$$

Sendo:

$V_b$  o volume de gás entre pontos estipulados no bolhometro ( $m^3$ );

$D_i$  o diâmetro interno da bureta (m);

$h$  a altura entre os dois pontos estipulados no bolhometro (m);

Os primeiros ensaios ocorreram com ar comprimido e foi necessário realizar a correção da vazão para condição padrão pela equação 19.

$$Q_R = Q_{op} \frac{P_{op} T_R}{P_R T_{op}} \quad (19)$$

Sendo:

$P_{op}$  a pressão de operação ;

$P_R$  a pressão de calibração do rotâmetro;

$T_{op}$  a temperatura de operação (K);

$T_R$  a temperatura de calibração do rotâmetro (K);

$Q_{op}$  a vazão do ar obtida no bolhometro (L/min ou L/h);

$Q_R$  a vazão do ar nas condições de calibração do rotâmetro (L/min ou L/h);

Quando utilizou-se o dióxido de carbono foi necessário determinar a vazão de leitura na pressão e temperatura de calibração do rotâmetro correspondente a vazão de dióxido de carbono nas condições de operação através da equação 15.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Seleção do sensor

O estudo iniciou-se ao testar o sensor de nível *reed switch* no protótipo da Figura 12 com objetivo de verificar a variação do tempo de escoamento da água entre os sensores com seu volume definido, no qual apareciam no display acoplado ao Arduino, em milissegundos. Foram realizados quinze ensaios, apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Tempo de escoamento utilizando sensor de nível**

ENSAIO	TEMPO (ms)
1	42206
2	42601
3	42521
4	42520
5	42731
6	42625
7	42520
8	42732
9	42521
10	42625
11	42415
12	42768
13	42553
14	42101
15	42205

O tempo médio dos ensaios apresentados é de 42509 milissegundos, com um desvio de 200,61 milissegundos. A dispersão desses valores, pode ser melhor observada na Figura 22.

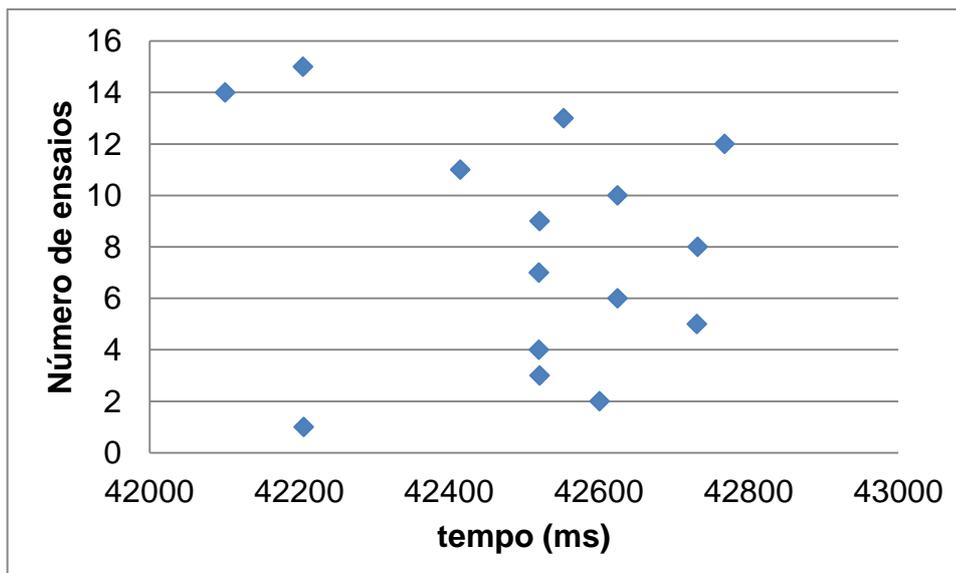


Figura 22 - Dispersão do tempo nos testes com o sensor de nível reed switch

Na Figura 22, o eixo das ordenadas corresponde ao número do ensaio, enquanto o eixo das abscissas representa o tempo, em milissegundos, assemelhando-se a um diagrama de pontos.

O tempo correspondente aos ensaios 3, 4, 7 e 9 apresentam uma diferença insignificante e deve-se considerar que em uma escala com a unidade maior no eixo das abscissas, variando em quinhentos milissegundos, por exemplo, os pontos estariam mais agrupados.

Em posse do resultado dos testes do sensor reed switch, verificou-se que não era adequado para o sistema. Então foram testados os sensores capacitivos, amplamente utilizados quando deseja-se detectar o nível da água devido ao seu tempo de resposta.

Diferentemente do sensor *reed switch*, eles foram testados no sistema de calibração, e o tempo de escoamento da água entre os sensores foi cronometrada e registrada pela placa microcontroladora, possibilitando a comparação do tempo.

A comparação entre os tempos pode ser observada na Tabela 4. Os valores apresentados na terceira coluna resultam da média entre os tempos obtidos por dois cronômetros e ressalta-se que a repetibilidade do ensaio se deve à redução de erros aleatórios, como o tempo de reação visual e de ação dos operadores. Levando isto em consideração, a diferença entre a grandeza indicada pelo microcontrolador e a média cronometrada não ultrapassa 2,43% .

**Tabela 4 - Comparação entre tempo registrado por cronômetro e a microcontroladora utilizando sensor capacitivo**

<b>Ensaio</b>	<b>Arduino (ms)</b>	<b>Cronômetro (ms)</b>	<b>Desvio (%)</b>
1	46509	46640	0,28
2	45582	46210	1,35
3	44038	44770	1,64
4	31475	32260	2,43
5	32195	32245	0,15
6	32403	32765	1,10
7	34225	34830	1,74
8	32402	34840	1,33
9	34152	34885	2,10
10	32329	32782	1,40
11	30806	30476	1,07
12	29378	29738	1,22
13	29376	29901	1,79
14	28437	28831	1,38
15	27913	28387	1,69

Considerando os dois tipos de sensores aptos para o aperfeiçoamento do sistema de calibração, preferiu-se o capacitivo. Este modelo é mais resistente por não possuir qualquer peça em contato com o fluido e evita possíveis danos na perfuração da torre.

### **3.2. Validação do Método e Curva de Calibração**

Após o desenvolvimento do circuito eletrônico, analisou-se o sistema de calibração a fim de conhecer suas limitações. Observou-se que para não romper a linha de gás, a pressão no manômetro não poderia ser superior a 20 psi, restringindo a faixa de medição dos rotâmetros a 25 LPM.

Também observou-se que a utilização do medidor bolhometro como referência foi restringida a um rotâmetro. Os demais rotâmetros encontraram-se fora das

condições de calibração em função do baixo tempo de leitura ou da limitação do equipamento a algumas vazões.

Os rotâmetros denominados R1, R2 e R3 na Tabela 5 e o conhecimento das limitações do permitiram o planejamento de 36 ensaios experimentais com quatro reproduções na intenção de reduzir os erros.

**Tabela 5 - Rotâmetros**

Rotâmetro	Fundo de escala	Flutuador
R1	150 NL/min	Cilíndrico com borda
R2	60 NL/h	Esférico, não original
R3	25 NL/min	Esférico

O planejamento dos ensaios, na Tabela 6, não pode ser considerado aleatório pois foi verificado que a ordem de utilização dos fluidos no sistema interferia na temperatura do sistema. A temperatura do ar comprimido nos ensaios realizados posterior ao uso do dióxido de carbono apresentava valor inferior à temperatura real.

**Tabela 6 - Planejamento dos ensaios**

Medidor	Fluido	Rotâmetro	Vazão de leitura
Bolhometro	Ar comprimido	R3	5 L/min
			10 L/min
			15 L/min
			20 L/min
	Dióxido de carbono	R3	5 L/min
			10 L/min
			15 L/min
			20 L/min
Torre	Ar comprimido	R1	5 L/min
			10 L/min
			15 L/min
			20 L/min
			continua

Tabela 6 - Planejamento dos ensaios (continuação)

Medidor	Fluido	Rotâmetro	Vazão de Leitura
Torre	Ar comprimido	R1	25 L/min
		R2	5 L/h
			10 L/h
			15 L/h
			20 L/h
			25 L/h
		R3	5 L/min
			10 L/min
			15 L/min
			20 L/min
	25 L/min		
	Dióxido de carbono	R1	5 L/min
			10 L/min
			15 L/min
			20 L/min
			25 L/min
		R2	5 L/h
			10 L/h
			15 L/h
			20 L/h
R3		5 L/min	
	10 L/min		
	15 L/min		
	20 L/min		

As dimensões referentes ao bolhometro necessárias para os cálculos foram mensuradas e estão apresentadas na Tabela 7. A altura de 144 mm correspondia ao intervalo entre os pontos estipulados para cronometrar o tempo de percurso da bolha. O cronômetro era disparado no momento em que a bolha alcançava o ponto

de 800 mL na bureta e a medição era estagnada quando a bolha atingia 1600 mL. Obteve-se nesse intervalo um volume de 0,794 litro, calculado pela equação 18.

**Tabela 7- Dimensões do bolhometro**

Grandeza	Medidas (mm)
Diâmetro externo	89,81
Espessura da parede	3,00
Diâmetro interno	83,81
Altura	144,00

Já as dimensões alusivas a torre, constantes em todos os cálculos, também foram determinadas e encontram-se na Tabela 8. Através das equações 9 e 11 foi determinado que o volume de gás na torre acima do sensor superior ( $V_1$ ) e acima do sensor inferior ( $V_2$ ) correspondem a 0,00099 m<sup>3</sup> e 0,003411 m<sup>3</sup>, respectivamente.

**Tabela 8 - Dimensões da torre do sistema de calibração**

Grandeza	Medidas (mm)
Diâmetro externo da torre	95,7
Espessura da parede da torre	6,0
Diâmetro interno da torre	83,7
Distância entre sensor superior e o topo da torre	180,0
Distância entre os sensores	440,0
Distância entre o nível da água e o sensor inferior	250,0

Os ensaios foram iniciados no bolhometro com o ar comprimido e o rotâmetro R3, apresentando os dados da Tabela 9. Os valores dispostos são a média de cinco ensaios e a pressão de operação é semelhante a pressão atmosférica obtida com um barômetro. A curva de calibração da Figura 23 relaciona a altura da posição do rotâmetro com a vazão obtida no medidor bolhometro sob as mesmas condições de temperatura e pressão, 21°C e 760 mmHg, respectivamente. Juntamente pode ser visualizado a correspondência dos desvios para cada faixa de trabalho do rotâmetro.

**Tabela 9 - Operação com ar. Vazão obtida através do bolhometro (referência) e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume do bolhometro de 0,794 L**

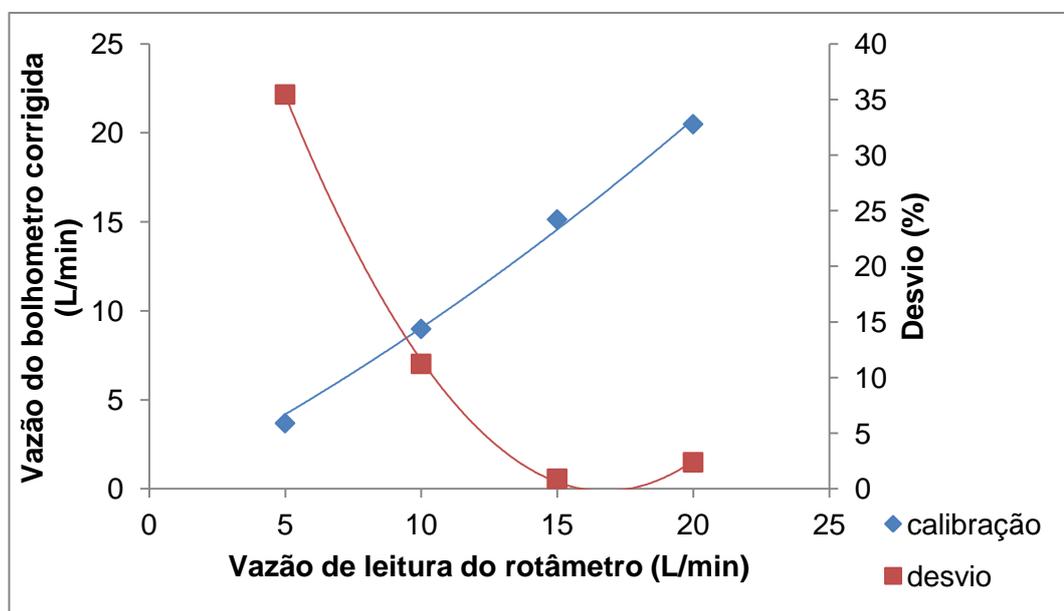
Rotâmetro R3 Escala (L/min)	Temperatura (°C)	Tempo referente ao volume do bolhometro (s)	Vazão bolhometro (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K) 760 mmHg	Desvio (%)
5	23,5*	13,034**	3,6551***	3,6913	35,46
10	23,5	5,352	8,9013	8,9895	11,24
15	23,5	3,178	14,9906	15,1390	0,92
20	23,5	2,348	20,2896	20,4905	2,39

\* 23,5 °C → 23,5 °C + 273,15 = 296,65 K Média de cinco ensaios

\*\* Média de cinco ensaios com dois cronômetros cada

$$*** Q_B = \frac{0,794 \text{ L}}{13,034 \text{ s}} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 3,6551 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$**** Q_R = 3,6551 \frac{\text{L}}{\text{min}} \frac{774,05 \text{ mmHg}}{296,65 \text{ K}} \frac{294,15 \text{ K}}{760 \text{ mmHg}} = 3,6913 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$



**Figura 23 - Curva de calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3) operando com ar a 21°C e 760 mmHg no bolhometro**

No medidor torre foi possível trabalhar com os três rotômetros utilizando o ar comprimido. Ao utilizar o rotâmetro R1, as vazões obtidas na torre foram corrigidas para as condições de calibração do medidor, 21°C e 760 mmHg, e estão

apresentadas na Tabela 10. Os desvios apresentados são considerados elevados para uma grande faixa de operação e não foi possível confrontar com os dados do bolhometro.

**Tabela 10 - Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min (R1). Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume da torre de 2,421 L**

Rotâmetro R1 Escala (L/min)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	Vazão corrigida 21°C (294,15K)760 mmHg	Desvio (%)
5	23,0*	11,895**	96445,94***	100751,70****	12,2712*****	59,25
10	23,0	8,534	96445,94	100751,70	17,1044	41,54
15	23,0	6,858	96445,94	100751,70	21,2862	29,53
20	23,0	6,049	96445,94	100751,70	24,1313	17,12
25	23,0	5,502	96445,94	100751,70	26,5320	5,77

\*23°C → 23°C + 273,15 = 296,15K. Média de cinco ensaios

\*\*Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** P_1 = P_B - \rho g(J + H) = 103198,2 \text{ Pa} - 997,538 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0,25 \text{ m} + 0,44 \text{ m})$$

$$P_1 = 96445,94 \text{ Pa}$$

$$**** P_2 = P_B - \rho g j = 103198,2 \text{ Pa} - 997,538 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,25 \text{ m} = 100751,70 \text{ Pa}$$

$$***** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100751,7 \text{ Pa} 0,003411 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{296,15 \text{ K} 101325 \text{ Pa}} = 0,00337 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{V_1 P_1 T_m}{T_2 P_m} = \frac{0,00099 \text{ m}^3 96445,94 \text{ Pa} 294,15 \text{ K}}{296,15 \text{ K} 101325 \text{ Pa}} = 0,00094 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{(0,00337 \text{ m}^3) - (0,00094 \text{ m}^3) \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}}{11,895 \text{ s} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 12,2712 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Apresenta-se na Figura 24 a curva de calibração que relaciona a posição do flutuador no rotâmetro R1 com a vazão do ar no medidor torre, convencionalmente como valor real, ambas a 21°C e 760 mmHg. Também é possível visualizar que em vazões maiores, quando havia maior dificuldade em estabilizar a posição do flutuador, a diferença entre as vazões de leitura e de operação no sistema era menor.

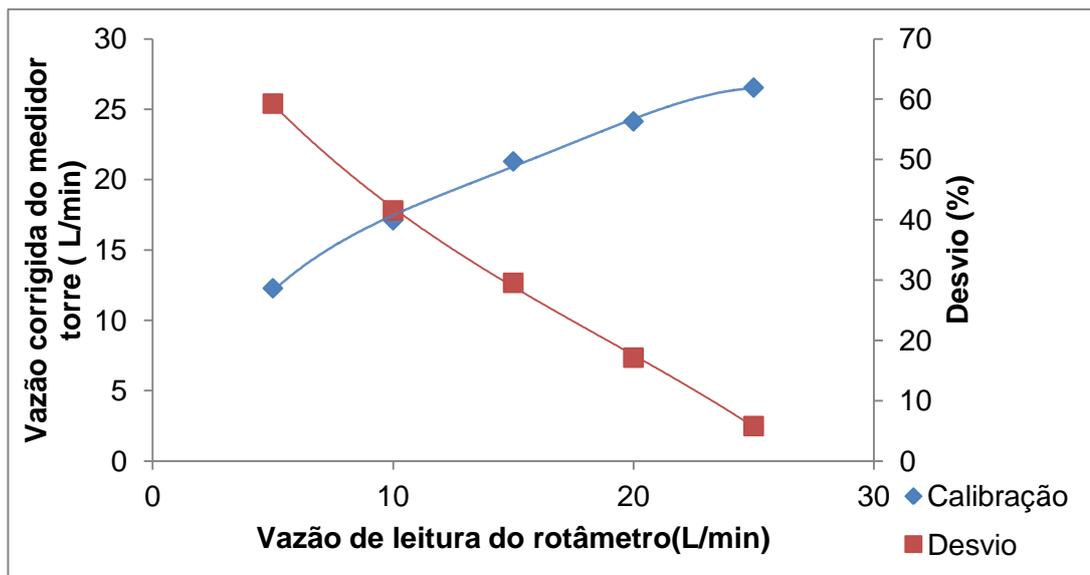


Figura 24 - Curva de Calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min (R1) operando com ar a 21°C e 760 mmHg

Na operação da torre com ar comprimido utilizando o rotâmetro R2 apresentou as vazões apontadas na tabela 11. O medidor em questão apresentava um flutuador não original e o ajuste da vazão foi dificultado pela graduação da escala ser de 3 L/h. A realização dos cálculos necessitou de atenção por este rotâmetro possuir temperatura e pressão de calibração diferente dos outros rotômetros, 32°C e 5149 mmHg, respectivamente. Esses fatores acrescidos dos arredondamentos nos cálculos acarretaram em desvios que variam de 49,15% a 112,65%.

**Tabela 11 - Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h (R2). Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume da torre de 2,421 L**

Rotâmetro R2 Escala (L/h)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	Vazão corrigida 32°C (305,15K) 5149 mmHg	Desvio (%)
5	23,5*	399,389**	96446,75***	100752,01****	3,3523*****	49,15
10	23,5	284,710	96446,75	100752,01	4,7026	112,65
15	23,5	168,507	96446,75	100752,01	7,9455	88,79
20	23,5	134,199	96446,75	100752,01	9,9769	100,46
25	23,5	100,959	96446,75	100752,01	13,2617	88,51

\* 23,5°C → 23,5°C + 273,15 = 296,65 K

\*\* Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino

$$*** P_1 = P_B - \rho g(J + H) = 103198,2 \text{ Pa} - 997,419 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0,25 \text{ m} + 0,44 \text{ m})$$

$$P_1 = 96446,75 \text{ Pa}$$

$$**** P_2 = P_B - \rho g j = 103198,2 \text{ Pa} - 997,419 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,25 \text{ m} = 100752,01 \text{ Pa}$$

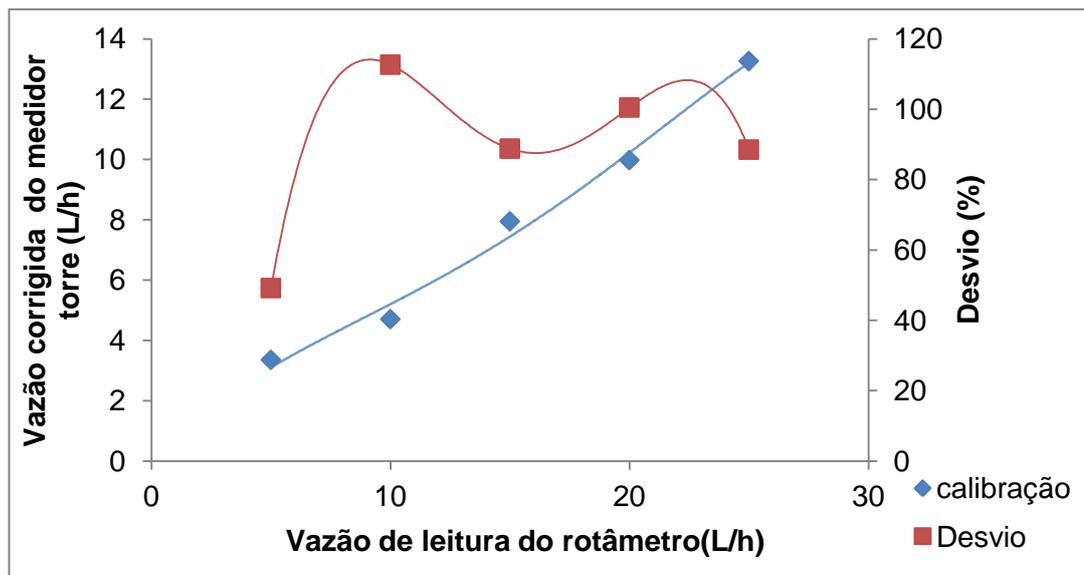
$$***** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100752,01 \text{ Pa} 0,003411 \text{ m}^3 305,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K} 686441 \text{ Pa}} = 0,00052 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{V_1 P_1 T_m}{T_1 P_m} = \frac{0,00099 \text{ m}^3 96446,75 \text{ Pa} 305,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K} 686441 \text{ Pa}} = 0,00014 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{(0,00052 \text{ m}^3) - (0,00014 \text{ m}^3) \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}}{399,389 \text{ s} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} = 3,3523 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

A curva de calibração da Figura 25 é a melhor representação da relação entre as vazões de leitura no rotâmetro R2 e as vazões obtidas no medidor torre. Os desvios apresentados por este rotâmetro, além de elevados, não possuem qualquer conformidade com as vazões.



**Figura 25 - Curva de calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h (R2) operando com ar a 32°C e 5149 mmHg**

Dentre todos os ensaios realizados no medidor torre com ar, o rotâmetro R3 apresentou os resultados mais eficientes (Tabela 12). Os baixos percentuais de desvio, que variam de 2,98% a 6,68%, e o confronto com os dados da tabela 9 indicaram que o rotâmetro estava calibrado. Delmée (1999) afirma que os rotômetros apresentam uma precisão medíocre, variando de 2% e 10%, dependendo da aplicação.

**Tabela 12 - Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume da torre de 2,421 L**

Rotâmetro R3 Escala (L/min)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	Vazão corrigida 21°C (294,15K)760 mmHg	Desvio (%)
5	23,5*	31,093**	96446,75***	100752,01****	4,6868*****	6,68
10	23,5	13,710	96446,75	100752,01	10,6291	5,92
15	23,5	9,425	96446,75	100752,01	15,4608	2,98
20	23,5	6,808	96446,75	100752,01	21,4057	6,57
25	23,5	5,483	96446,75	100752,01	26,5765	5,93

\*23,5°C → 23,5°C + 273,15 = 296,65K. Média de cinco ensaios

\*\*Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** P_1 = P_B - \rho g(J + H) = 103198,2 \text{ Pa} - 997,419 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0,25 \text{ m} + 0,44 \text{ m})$$

$$P_1 = 96446,75 \text{ Pa}$$

$$**** P_2 = P_B - \rho gJ = 103198,2 \text{ Pa} - 997,419 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,25 \text{ m} = 100752,01 \text{ Pa}$$

$$***** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100752,01 \text{ Pa} 0,003411 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K} 101325 \text{ Pa}} = 0,00336 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{V_1 P_1 T_m}{T_2 P_m} = \frac{0,00099 \text{ m}^3 96446,75 \text{ Pa} 294,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K} 101325 \text{ Pa}} = 0,00094 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{(0,00336 \text{ m}^3) - (0,00094 \text{ m}^3) \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}}{31,093 \text{ s} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 4,6868 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Na Figura 26 pode-se observar uma linearidade na curva de calibração do R3. A corroboração dos resultados no medidor torre e medidor bolhometro indicam a validação do método de calibração no sistema em estudo.

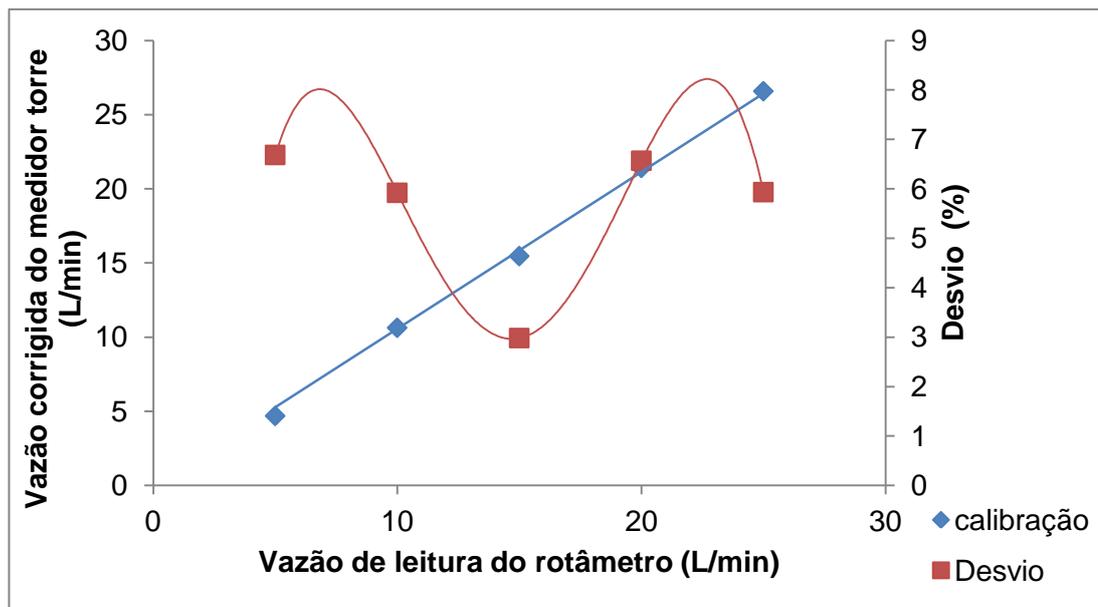


Figura 26 - Curva de calibração e erro do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3) operando com ar a 21°C e 760 mmHg

Certificando-se que o método de calibração através do sistema aperfeiçoado é admissível, procurou-se realizar ensaios com um gás disponível no laboratório de operações unitárias. Entre o nitrogênio e o dióxido de carbono, decidiu-se pelo segundo devido a massa molar ser distinto da massa molar do ar.

Ao alimentar o bolhometro com o dióxido de carbono foi obtido os resultados da Tabela 13 com o rotâmetro R3. A "vazão bolhometro" é a vazão real do  $\text{CO}_2$  obtida no bolhometro a temperatura e pressão de operação, enquanto a "vazão corrigida" corresponde a vazão de leitura no rotâmetro calibrado com ar a 21°C e 760 mmHg calculada com as equações 15, 16 e 17. Os desvios entre a vazão corrigida e a vazão de leitura na escala do rotâmetro apresentam valores coerentes e a curva de calibração que relaciona a vazão de  $\text{CO}_2$  no bolhometro com a posição do flutuador no rotâmetro encontra-se na Figura 27.

**Tabela 13 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através do bolhometro (referência) e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). Pressão barométrica=774,05 mmHg. Volume do bolhometro= 0,794 L**

Rotâmetro R3 Escala (L/min)	Temperatura (°C)	Tempo referente ao volume do bolhometro (s)	Vazão bolhometro (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K) 760 mmHg	Desvio (%)
5	23,5*	12,167**	3,9155***	4,8505****	3,08
10	23,5	6,364	7,4859	9,2734	7,84
15	23,5	3,778	12,6098	15,6209	3,98
20	23,5	2,822	16,8816	20,9128	4,36

\*23,5°C → 23,5°C + 273,15= 296,65 K. Média de cinco ensaios

\*\*Média de cinco ensaios com dois cronômetros

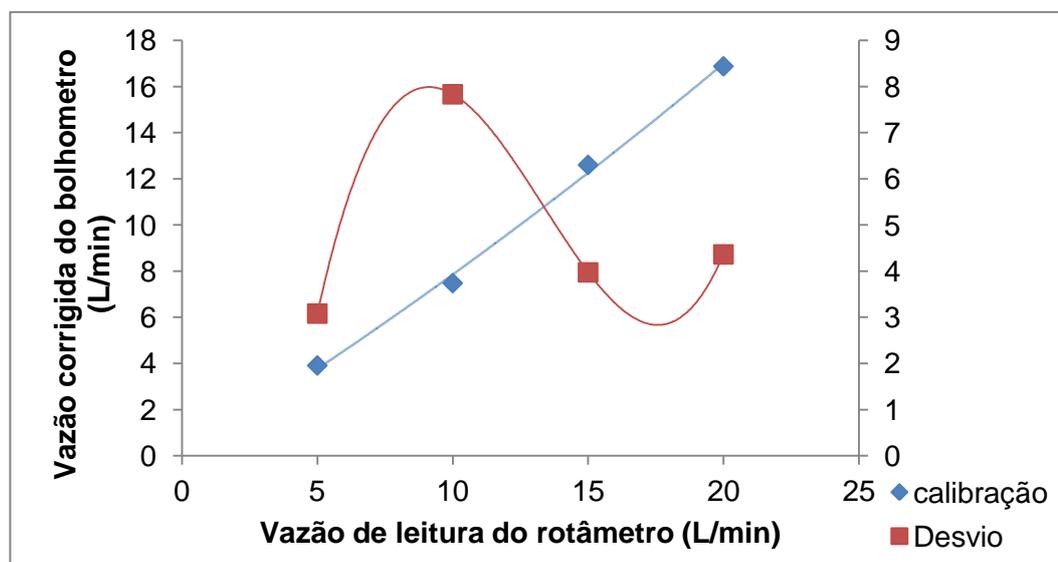
$$*** Q_B = \frac{V}{t} = \frac{0,794 \text{ L}}{12,167 \text{ s}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 3,9155 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$**** Q_R = Q_{\text{operação}} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2 \text{ operação}}}{\rho_{\text{ar ref. rot.}}} \right)^{0,5}$$

$$\rho_{\text{CO}_2 \text{ operação}} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} = \frac{1,03198 \text{ bar} \cdot 44,00995 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} \cdot 296,65 \text{ K}} = 1,8414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar ref rot}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} = \frac{1,01325 \text{ bar} \cdot 28,9625 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} \cdot 294,15 \text{ K}} = 1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_R = 3,9155 \frac{\text{L}}{\text{min}} \left( \frac{1,8414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 4,8505 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$



**Figura 27 - Curva de calibração do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3) operando com dióxido de carbono no bolhometro**

Os ensaios realizados com o rotâmetro R1 no medidor torre operando com dióxido de carbono foram apresentados na Tabela 12. A "vazão torre" representa a vazão do gás nas condições de calibração do rotâmetro, 21°C e 760 mmHg.

Observa-se na configuração do sistema de calibração da Figura 8 que a alimentação do dióxido de carbono ocorre pela base da torre e parte dele é retido em água por diferença de solubilidade semelhante a uma coluna de absorção. A solubilidade do gás varia proporcionalmente a pressão e inversamente proporcional a temperatura. Então, para todos os ensaios, a vazão do medidor do sistema de calibração deve ser inferior a vazão de leitura no rotâmetro e a vazão real do gás desconhecida, impedindo a construção da curva de calibração.

Os ensaios com o R1 sugerem que o instrumento de medição não é indicado em operações a 5 L/min e 10 L/min por apresentarem desvios elevados e as vazões obtidas no medidor torre serem superiores ao de leitura.

**Tabela 14 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 150 NL/min (R1). Pressão barométrica de 780,0 mmHg. Volume da torre de 2,421 L**

Rotâmetro R1 Escala (L/min)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	Vazão torre (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K)760 mmHg	Desvio (%)
5	20,0*	20,258**	7,3355***	9,0425****	44,71
10	20,0	14,976	9,9229	12,2319	18,25
15	20,0	11,990	12,3946	15,2788	1,82
20	20,0	9,352	15,8907	19,5885	2,10
25	20,0	7,356	20,2018	24,9028	0,39

\* 20,0°C → 20,0°C + 273,15 = 293,15 K. Média de cinco ensaios.

\*\* Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{101543,4 \text{ Pa } 0,003411 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K } 101325 \text{ Pa}} = 0,00343 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{P_1 V_1 T_m}{T_1 P_m} = \frac{97234,7 \text{ Pa } 0,00099 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K } 101325 \text{ Pa}} = 0,00095 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{0,00343 \text{ m}^3 - 0,00095 \text{ m}^3}{20,258 \text{ s}} \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 7,3355 \frac{\text{L}}{\text{min}} \text{ de CO}_2 \text{ a } 21^\circ\text{C } 760 \text{ mmHg}$$

$$**** Q_{\text{rot (ref ar)}} = Q_{\text{CO}_2} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{ar}}} \right)^{0,5}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} = \frac{1,01325 \text{ bar } 44,00995 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 294,15 \text{ K}} = 1,8234 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} = \frac{1,01325 \text{ bar } 28,9625 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 294,15 \text{ K}} = 1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{rot (ref ar)}} = 7,3355 \frac{\text{L}}{\text{min}} \left( \frac{1,8234 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 9,0425 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Os resultados do rotâmetro R2 com dióxido de carbono na torre comprovam a falta de calibração do instrumento com os desvios que ultrapassam 31,92% e atingem 121,36%, mesmo considerando que parte do dióxido de carbono foi absorvido pela coluna de água.

**Tabela 15 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 60 NL/h (R2). Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume da torre de 2,421 L**

Rotâmetro R2 Escala (L/h)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	Vazão torre (L/h)	Vazão corrigida 32°C (305,15K) 5149 mmHg	Desvio (%)
5	22,0*	437,679**	3,0746***	3,7900****	31,92
10	21,0	344,914	3,9148	4,8257	107,22
15	24,0	243,156	5,4970	6,7762	121,36
20	24,0	156,463	8,5428	10,5307	89,92
25	24,5	127,863	10,4360	12,8645	94,33

\* 22,0°C → 22,0°C + 273,15 = 295,15 K. Média de cinco ensaios.

\*\* Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100751,1 \text{ Pa } 0,003411 \text{ m}^3 305,15 \text{ K}}{295,15 \text{ K } 686441 \text{ Pa}} = 0,00052 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{P_1 V_1 T_m}{T_1 P_m} = \frac{96444,37 \text{ Pa } 0,00099 \text{ m}^3 305,15 \text{ K}}{295,15 \text{ K } 686441 \text{ Pa}} = 0,00014 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{0,00052 \text{ m}^3 - 0,00014 \text{ m}^3}{437,679 \text{ s}} \frac{1000 \text{ L } 3600 \text{ s}}{1 \text{ m}^3 1 \text{ h}} = 3,0746 \frac{\text{L}}{\text{h}} \text{ de CO}_2 \text{ a } 32^\circ\text{C } 5149 \text{ mmHg}$$

$$**** Q_{\text{rot (ref ar)}} = Q_{\text{CO}_2} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{ar}}} \right)^{0,5}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} = \frac{6,86441 \text{ bar } 44,00995 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 305,15 \text{ K}} = 11,9073 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} = \frac{6,86441 \text{ bar } 28,9625 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 305,15 \text{ K}} = 7,8361 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{rot (ref ar)}} = 3,0746 \frac{\text{L}}{\text{h}} \left( \frac{11,9073 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{7,8361 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 3,7900 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Os dados de referência para o rotâmetro R3 da Tabela 13 referentes aos valores do medidor bolhometro podem ser comparados com os valores indicados na Tabela 16 do medidor torre. Conforme os desvios, o uso desse rotâmetro é indicado para uma faixa de 10 L/min a 20 L/min. Com isso, os valores do rotâmetro R3 tiveram uma proximidade.

**Tabela 16 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min (R3). Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume da torre de 2,421 L**

Rotâmetro R3 Escala (L/min)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	Vazão torre (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K)760 mmHg	Desvio (%)
5	20,0*	50,195**	2,9378***	3,6214****	38,07
10	20,0	18,838	7,8280	9,6496	3,63
15	20,0	12,226	12,0615	14,8682	0,89
20	19,0	8,237	17,9638	18,2349	9,68

\* 20,0°C → 20,0°C + 273,15 = 293,15 K. Média de cinco ensaios.

\*\*Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100750,1 \text{ Pa } 0,003411 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K } 101325 \text{ Pa}} = 0,00340 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{P_1 V_1 T_m}{T_1 P_m} = \frac{96441,44 \text{ Pa } 0,00099 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K } 101325 \text{ Pa}} = 0,00095 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{0,00340 \text{ m}^3 - 0,00095 \text{ m}^3}{50,195 \text{ s}} \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 2,9378 \frac{\text{L}}{\text{min}} \text{ de CO}_2 \text{ a } 21^\circ\text{C } 760 \text{ mmHg}$$

$$**** Q_{\text{rot (ref ar)}} = Q_{\text{CO}_2} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{ar}}} \right)^{0,5}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} = \frac{1,01325 \text{ bar } 44,00995 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 294,15 \text{ K}} = 1,8234 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} = \frac{1,01325 \text{ bar } 28,9625 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 294,15 \text{ K}} = 1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{rot (ref ar)}} = 2,9378 \frac{\text{L}}{\text{min}} \left( \frac{1,8234 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 3,6214 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

## 4. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

### 4.1. Conclusão

O presente trabalho permitiu as seguintes conclusões:

a. A construção do protótipo para testar os sensores de nível foi de grande valia, mesmo em posse do conhecimento do tempo de resposta do sensor capacitivo. Com os ensaios realizados, ambos apresentaram bom desempenho e não foi possível identificar a presença de erro dinâmico, necessitando recorrer a outras características do sensor para a seleção.

b. A construção do circuito eletrônico e a programação da placa microcontroladora Arduino ocorreu de modo fácil e acessível, capaz de substituir o uso do cronômetro da unidade. Porém, não foi possível afirmar que reduziram os erros no processo de calibração.

c. Através dos resultados obtidos nos medidores torre e bolhometro (referência) percebeu-se que apenas o rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min encontrava-se calibrado.

d. A realização de ensaios com o ar comprimido e o dióxido de carbono possibilitaram a validação do método de calibração. Ressalva-se que a medição de vazão através do medidor torre não é indicado para gases com solubilidade em água superior ao do dióxido de carbono.

## 4.2. Sugestões

Visando a continuidade da pesquisa, sugere-se:

- a. Substituir o rotâmetro por outro instrumento de medição com maior exatidão, como as placas de orifício, para a realização de novos ensaios.
- b. Instalar uma tela LCD para melhor visualização dos dados registrados pela microcontroladora.
- c. Realizar maiores estudos referente a erros e incerteza na medição.

# Sistema de Calibração de Medidores de Vazão de Gases utilizando Microcontrolador Arduino

## Calibration System for Gas Flow Meters Using Arduino Microcontroller

Pinheiro Brasil, Anderson dos Santos  
Universidade Santa Cecília - UNISANTA, Santos, SP  
professorandersonbrasil@gmail.com

Santos, Aldo Ramos  
Universidade Santa Cecília - UNISANTA, Santos, SP  
rsantos@unisanta.br

Moraes, Marlene Silva  
Universidade Santa Cecília - UNISANTA, Santos, SP  
marlene@unisanta.br

Rosa, Vitor da Silva  
Universidade Santa Cecília - UNISANTA, Santos, SP  
victor@unisanta.br

Moraes Júnior, Deovaldo de  
Universidade Santa Cecília - UNISANTA, Santos, SP  
deovaldo@unisanta.br

Resumo: O controle e a medição da vazão ocorre em todas as etapas de manipulação do fluido, pois permite otimizar o desempenho dos equipamentos e das operações. Quando o fluido é um gás, a medição torna-se complexa, uma vez que a grandeza varia com a temperatura e pressão. Atualmente existem diversos modelos de medidores de vazão de ar e gases que devem ser calibrados pelo fabricante e periodicamente volta-se a efetuar a calibração, garantindo a qualidade e precisão dos medidores. Este trabalho teve por objetivo aperfeiçoar um sistema de calibração de medidores de vazão de gases utilizando o ar comprimido e o gás carbônico por método volumétrico com correção de pressão e temperatura. No sistema foi inserido um circuito eletrônico com placa microcontroladora Arduino e um medidor bolhometro. Na comparação entre as vazões obtidas nos medidores do sistema e no rotâmetro viu-se que o rotâmetro estava calibrado apresentando desvio inferior a 1% no ponto central da escala e o método de calibração foi validado.

Palavras-chave: Calibração; medidor de vazão.

Abstract: The control and measurement of this variable occurs throughout all the stages of manipulation of a fluid, since it allows to optimize the performance of the equipment and the operations. When the fluid is a gas, the measurement becomes complex, since the magnitude varies with temperature and pressure. Currently there are several models of air and gas flow meters that must be calibrated by the manufacturer and periodically re-calibrates, ensuring the quality and accuracy of the meters. The objective of this work was to improve a calibration system of gas flow meter using air and carbon dioxide by volumetric method with pressure and temperature correction.

In the system was inserted an electronic circuit with microcontroller board Arduino and a bolhometer meter. In the comparison between the flows obtained in the system meters and in the rotameter, it was calibrated with a deviation of less than 1% at the central point of the scale and the calibration method was validated.

Key words: Calibration; flowmeter.

## 1 Introdução

A vazão é uma das grandezas mais importantes dos processos industriais. Ela é definida como a quantidade de um produto, expressa em massa ou volume, que passa por determinado ponto de referência, em certo intervalo de tempo. Medir e controlá-la parece irrelevante no cotidiano, porém é de extrema importância na indústria para otimizar o desempenho de equipamentos e operações que exigem vazões específicas, motivando os fabricantes a investirem constantemente em inovações. [1]

Atualmente existe uma variedade de tipos e modelos de instrumento de medição, com diferentes princípios de funcionamento, amplas possibilidades de aplicação e maiores precisões. Mas a falta de padronização na confecção desses instrumentos, torna importante a calibração. [2]

A calibração é a verificação do desempenho do medidor, considerada confiável quando as medições são replicadas; os procedimentos são claros, objetivos e realizados por operadores com experiência e habilidade; e as variáveis, como temperatura e pressão, são conhecidas e controladas [3]. Em um primeiro momento, ela deve ser realizada pelo fabricante e posteriormente o usuário deve verificar se a calibração e os fatores definidos permanecem os mesmos, garantindo a qualidade da medição e realizando ajustes para compensação de possíveis erros.

O conjunto de operações relativo a calibração pode ser realizado pelo usuário ou externamente, em um laboratório credenciado da Rede Brasileira de Calibração ou enviando para o fabricante, considerando o custo e a complexidade das operações, uma vez que todos os métodos são complexos por envolver simultaneamente mais de um padrão, massa e tempo ou volume e tempo.

Muitas calibrações e ajustes dos medidores de vazão são realizados pelo método comparativo. Como métodos de calibração que constituem elementos primários de vazão são trabalhosos e complexos para indicações de rotina, seus valores exatos são transferidos para outros sistemas de medição de vazão pela estruturação de uma cadeia de rastreabilidade. Ou seja, um elemento de medição primário, como o gasômetro ou bocal sônico, calibra um medidor padrão secundário, que por sua vez calibra um medidor padrão de trabalho e finalmente calibra um medidor de vazão operacional [4].

As limitações dos métodos de medição da vazão e a influência no processo de diversas variáveis não permitem que a exatidão desses instrumentos sejam iguais aos que medem outras grandezas. É recomendado que a classe de exatidão dos medidores de vazão seja determinada, tendo em vista o erro máximo admissível, que inclui erros de linearidade, repetibilidade e histerese.

O erro de linearidade ocorre quando a medição do instrumento não coincide com a linha reta de calibração, ou seja, é o erro máximo que uma característica se afasta de sua

função linear. Já a histerese pode ser definida como o desvio percentual máximo com o qual, para uma mesma vazão, uma indicação do valor instantâneo se afasta de outro valor, quando o instrumento de medição é estimulado no sentido de pressão crescente ou decrescente [2]. Enquanto que a repetibilidade do instrumento está relacionada a proximidade dos valores obtidos em medições consecutivas sob as mesmas condições. Os valores, o método, o instrumento de medição e o local devem ser os mesmos.

A exatidão de um instrumento de medição é o grau de concordância entre o valor indicado no medidor e aquele considerado ideal ou padrão. Este termo é comumente confundido com outra expressão relacionada a calibração: a precisão. A precisão é uma condição para a exatidão, refere-se ao grau de concordância mútua e consistente entre várias medições individuais, relacionadas à repetibilidade e à reprodutibilidade. A reprodutibilidade é o agrupamento de medições do mesmo valor sob condições diferenciadas.

Se o erro é um valor pontual da diferença entre os valores verdadeiramente mensurados e o resultado da medição, a dúvida associada ao valor estimado como real é a incerteza. Ela é proveniente da tendência errônea na leitura do instrumento analógico; dos valores inexatos dos padrões de medição e do material de referência; e das aproximações ou suposições realizadas no procedimento de medição ou do método. A incerteza é analisada através de uma avaliação estatística de dados obtidos na avaliação ou buscando informações com dados de medições anteriores, certificado de calibração e especificações do fabricante.

Com o intuito de minimizar os erros na calibração dos medidores, aumentando o nível de qualidade do método, preferem-se métodos com alguma automatização, reduzindo a presença de operadores.

O presente trabalho, oriundo da dissertação do mestrado em Engenharia Mecânica, teve por objetivo aperfeiçoar um sistema de calibração de medidores de vazão de gases por método volumétrico com correção de temperatura e pressão presente no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília - UNISANTA. Para tal, visou-se: a) desenvolver um circuito eletrônico acessível, com uma placa Arduino microcontroladora, dois relés, dois sensores e duas fontes de alimentação e desenvolver um código para registrar o tempo de variação do nível da água entre os sensores, em substituição ao uso do cronômetro por operador; b) realizar a calibração de rotâmetro e determinar as limitações do sistema; c) analisar o sistema de calibração utilizando ar comprimido e o dióxido de carbono na obtenção de dados; e d) adicionar um medidor de vazão de gases do tipo bolhometro como referência para validação do método do medidor torre.

## 2 Material e Métodos

Apresenta-se na Figura 1 o sistema de calibração de medidores de vazão de gases com placa microcontroladora Arduino, o *display* e os sensores de nível.

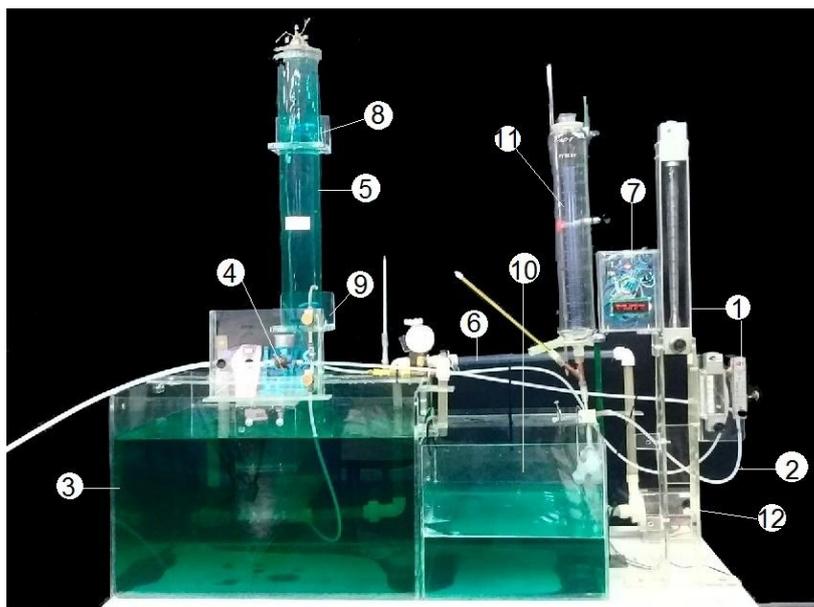


Figura 28- Sistema de calibração de medidores de vazão de gases. 1) Rotâmetro; 2) Linha de ar ou gás; 3) tanque principal (TQ-01); 4) válvula reguladora de pressão com manômetro; 5) tubo de acrílico vertical (medidor torre) com dois sensores de nível; 6) linha de água para preencher a torre; 7) Placa Arduino Uno com display; 8) Sensor de nível superior; 9) Sensor de nível inferior; 10) tanque auxiliar (TQ-02); 11) Bolhometro; 12) Bomba Centrífuga.

## 2.1 O sistema de calibração de medidores de vazão de gases

Apresenta-se na Figura 2 o esboço do sistema de calibração.

O sistema foi formado basicamente por:

- l. Um tanque de acrílico principal (TQ-01) com 400 mm de altura, 600 mm de largura, 610 mm de comprimento e um vertedor que impedia que o nível fique acima de 313 mm;
- m. Um tanque auxiliar (TQ-02) com 305 mm de altura, 600 mm de largura e 350 mm de comprimento;
- n. Um tubo de acrílico vertical com 1000 mm de altura, diâmetro interno médio de 83,7 mm e parede com 6 mm de espessura, usualmente chamado de torre;
- o. Uma bomba centrífuga com 34 W, 220V, instalada na saída do tanque auxiliar (TQ-02) para transportar a água para a torre;
- p. Um manômetro com faixa de trabalho de 0 a 60 psi a montante do medidor de vazão acoplado a uma válvula reguladora de pressão.
- q. Uma válvula reguladora de pressão (V-02) com manômetro;
- r. Três válvulas de agulha para controlar o fluxo de ar. Duas encontravam-se a jusante do rotâmetro e operavam combinadas. Quando a válvula que controlava o fluxo para a torre (V-04) encontrava-se fechada, a válvula que controlava o fluxo para a atmosfera (V-03) ficava aberta ou o contrário. A terceira encontrava-se no topo da torre (V-05), despressurizando-a quando estava sendo preenchido por água;
- s. Uma válvula de globo (V-06) na que limitava o fluxo de água destinada para a torre;
- t. Três válvulas de esfera. A primeira (V-01) alimentava a entrada de ar na torre. A segunda (V-07) posicionada a jusante da bomba centrífuga que controlava o fluxo do reciclo. A terceira encontrava-se submersa (V-08) próxima à torre, impedindo que a água da torre escorresse quando fechada;
- u. Tubos de PVC transparente de 1/2 polegada;

v. Mangueira de PEBD - Polietileno de Baixa Densidade com diâmetro de 1/8 de polegada;

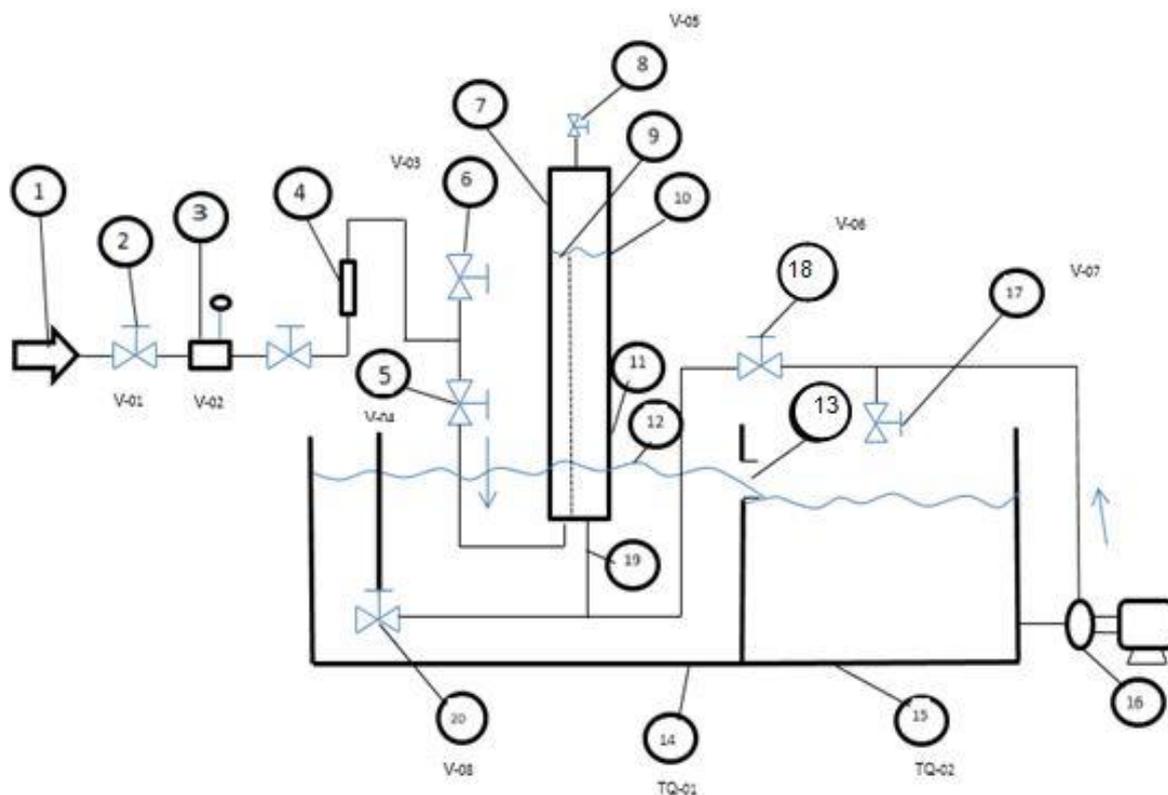


Figura 29- Esboço do sistema de calibração. 1) entrada de ar ou gás; 2) válvula geral de alimentação do ar ou gás no sistema; 3) válvula de regulagem fina da base do medidor a ser calibrado (rotâmetro); 4) rotâmetro; 5) válvula de alimentação da torre; 6) válvula para liberar o ar ou gás para a atmosfera; 7) torre; 8) válvula de topo da torre, aberta no preenchimento de água e fechada na operação de calibração com a entrada de ar ou gás; 9) nível do líquido na torre; 10) sensor de nível superior; 11) sensor de nível inferior; 12) nível constante de água no tanque principal mantido por vertedor; 13) vertedor; 14) tanque principal; 15) tanque auxiliar; 16) bomba centrífuga para preencher o medidor torre; 17) válvula do reciclo da água para o tanque auxiliar; 18) válvula de alimentação de água da torre; 19) duto de entrada de água da torre; 20) válvula submersa com manopla acima do nível da água, fechada para a entrada de água na torre e aberta na operação de calibração.

O instrumento de medição utilizado no estudo foi um rotâmetro, presente na Figura 3, moldado em policarbonato com uma válvula para ajuste de vazão com precisão e fundo de escala de 25 NL/min. Foi calibrado pelo fabricante tendo como referência a temperatura e pressão de 530 R (21°C) e 14,7 psi (760 mmHg), respectivamente.



Figura 30- Rotômetro com fundo de escala 25 NL/min.

No aperfeiçoamento do sistema foi inserido um medidor de vazão do tipo bolhometro utilizado como referencia para os dados obtidos no medidor torre. Esse medidor é muito utilizado como padrão primário para calibrar outros medidores de baixa vazão devido sua boa precisão [5].

O medidor, observado na Figura 4, consistia em uma bureta com capacidade de 2000 mL e uma conexão em sua extremidade que permitia acoplar o instrumento de medição e a seringa que bombeava a solução aquosa responsável pela formação da bolha.

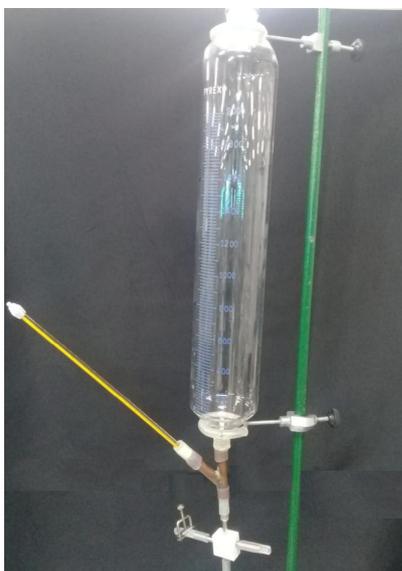


Figura 31- Bolhometro

A segunda melhoria no sistema foi a inserção do circuito eletrônico representado na Figura 5. Além dos relés e das fontes de alimentação encontra-se um display conectado a uma placa microcontroladora Arduino Uno. Ela é um computador completo formada por uma unidade central de processamento (CPU), memória flash e memória de acesso aleatório (RAM). A programação é realizada de forma simples e compreensível, permitindo que o tempo de variação do nível da água entre os sensores fosse registrado. As características elétricas da placa encontra-se na Tabela 1.





Figura 33- Dispositivo para teste do sensor de nível

Os sensores de nível reed switch comumente chamado de chave de nível é classificado como um sensor mecânico por possuir uma chave reed switch que abre ou fecha quando detecta a presença de água com um flutuador magnético [6]. Esse sensor é composto de poliacetal (POM), trabalha a uma potência de 20 W, aproximadamente, que gera corrente suficiente para a sinalização na placa microcontroladora [7].

A segunda opção de sensor era do tipo capacitivo (Figura 7). Esse sensor metálico não entra em contato com o fluido e é composto por uma placa sensível, um oscilador, um circuito detector, um circuito trigger e um circuito de comutação. A corrente máxima de comutação e a corrente de consumo são de 400 mA e 15 mA, respectivamente. Ele trabalha numa faixa de operação de 0 a 50°C e possui proteção contra inversão de polaridade, picos reversos na carga, sobrecarga e curto circuitos na saída. A tensão de alimentação é de 10 a 30 DCV, enquanto a função de saída é normalmente aberto (NA) e a configuração PNP possui sinal de saída positivo.



Figura 34- Sensor Capacitivo metálico com rosca faceado

O funcionamento do sensor capacitivo baseia-se na alteração da frequência de oscilação do circuito ressonante com a variação do valor da capacitância que ocorre entre a placa sensível e o ambiente sob aproximação da água. A mudança de frequência é enviada ao circuito detector onde é transformado em tensão. Essa tensão é recebida no circuito trigger e

transformado em onda quadrada para excitar o circuito de comutação, bastando para acionar outros circuitos [7].

Ele tornou-se uma boa alternativa por ser amplamente utilizado no controle de nível da água. A água é um ótimo atuador com constante dielétrica igual a oitenta e distância nominal de comutação ( $S_n$ ) igual à distância real de comutação ( $S_r$ ) [8]. Os testes desse sensor foram realizados no próprio sistema de calibração.

## 2.2 Métodos

Os métodos descritos nesta seção são referentes à seleção do sensor, à medição da vazão nos medidores bolhometro, utilizado como referência, e torre para calibração do instrumento de medição rotâmetro.

### 2.2.1 Seleção dos sensores

O teste realizado com o sensor de nível reed switch consistia em abastecer o protótipo com água, desobstruir uma constrição próximo a base do dispositivo e acompanhar o escoamento da água. Quando esta atingia o sensor superior, iniciava a medição do tempo que era estagnada no nível do sensor inferior. O tempo era exibido em milissegundos no display acoplado à placa microcontroladora Arduino e anotado. A válvula era fechada e voltava-se a repetir o ensaio. Como a vazão de escoamento da água não alterava, posteriormente os tempos foram comparados.

A realização dos testes com o sensor capacitivo ocorreu posteriormente no próprio sistema de calibração, no medidor torre. Ao contrário dos testes realizados no protótipo, a vazão de escoamento da água no medidor torre dependia da habilidade do operador em abrir completamente a válvula V-08. Por este motivo, o escoamento da água entre os sensores foi acompanhado por dois operadores cronometrando o tempo. Então o tempo exibido display e a média entre os tempos cronometrados pelos operadores foram comparados.

### 2.2.2 Calibração do rotâmetro

A calibração do rotâmetro ocorreu pelo método comparativo. No medidor torre, a vazão era obtida pela relação entre o volume do gás com o deslocamento do nível da água cronometrado entre os sensores. Os fluidos utilizados no estudo foram o ar comprimido e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Inicialmente, com a bomba centrífuga e as fontes de alimentação do circuito eletrônico ligados à energia, a torre foi preenchida com água, fechando a válvula de esfera V-08, abrindo as válvulas de globo V-06, agulha V-05 e de esfera V-07 e ligando a bomba centrífuga. Durante o preenchimento da torre foi observado que a palavra "enchendo" aparecia no display conectado à placa Arduino, confirmando o funcionamento do circuito.

Após a torre ser carregada, a válvula de agulha V-05 foi fechada e a bomba desligada. Então, abriu-se a válvula V-01 e regulou-se a pressão do ar comprimido ou do dióxido de carbono através da válvula reguladora V-02 e verificou se a válvula agulha V-03 estava aberta. Então, a vazão no rotâmetro foi ajustada e simultaneamente a válvula V-03 foi fechada e a V-04 aberta, seguidas da abertura da válvula de esfera V-08, permitindo que o volume de água fosse substituído pelo ar ou dióxido de carbono. Neste momento, a temperatura dos fluidos foram medidas com o auxílio de um termômetro para a determinação das massas específicas.

Conforme o nível da água descia e atingia o nível do sensor superior, foi possível determinar o volume e a pressão do ar ou gás, no momento, com auxílio das equações 1 e 2, respectivamente, e iniciou-se a medição do tempo.

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (1)$$

$$P_1 = P_B - \rho g(J + H) \quad (2)$$

Sendo:

$V_1$  o volume do gás acima do ponto do sensor superior na condição operacional ( $m^3$ );

$D$  o diâmetro interno da torre (m);

$L$  a altura entre o sensor superior e o topo da torre (m);

$P_1$  a pressão no nível do líquido, no sensor superior (Pa);

$P_B$  a pressão no ponto B, como observado na Figura 8, e de valor semelhante à pressão atmosférica determinada por um barômetro (Pa);

$\rho$  a massa específica da água ( $Kg/m^3$ );

$g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$J$  a distância entre o nível da água no tanque e o sensor inferior (m);

$H$  a altura entre os sensores (m);

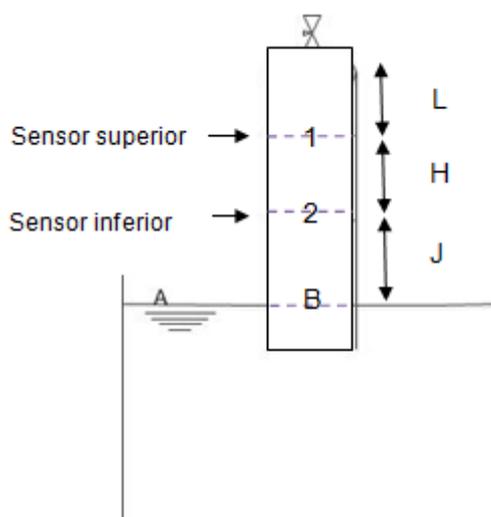


Figura 35- Esquema da vista lateral do tanque de acrílico e a torre. Fonte: Próprio autor

Quando o nível da água igualou-se ao nível do sensor inferior, a medição foi pausada e o volume e a pressão foram calculados (Equação 3 e 4).

$$V_2 = \frac{\pi D^2}{4} (L + H) \quad (3)$$

$$P_2 = P_B - \rho gJ \quad (4)$$

Sendo:

$V_2$  o volume acima do ponto do sensor inferior na condição experimental ( $m^3$ );

$P_2$  a pressão no nível do líquido, no sensor inferior (Pa);

Foi realizada a medição do tempo pela placa microcontroladora e dois cronômetros. Após o registro do tempo, a válvula V-03 foi aberta ao mesmo tempo que a válvula V-04 foi fechada. Imediatamente, a válvula V-05 foi aberta e a válvula V-08 fechada, deixando o sistema em

condições para iniciar outro ensaio.

Como o volume dos gases varia de acordo com a pressão e temperatura, o volume do ar ou do dióxido de carbono nos pontos supracitados foram corrigidas pela equação 5.

$$V_m = \frac{V P T_m}{T P_m} \quad (5)$$

Sendo:

$V_m$  o volume acima do ponto desejado corrigido para as condições do medidor ( $m^3$ );

$V$  o volume acima do ponto desejado nas condições do ensaio ( $m^3$ );

$P$  a pressão no nível do líquido, seja no sensor inferior ou superior (Pa);

$T$  a temperatura do ar ou dióxido de carbono (K);

$T_m$  a temperatura nas condições do medidor a ser calibrado (K);

$P_m$  a pressão nas condições indicadas no medidor a ser calibrado (Pa);

Uma vez que o tempo de escoamento da água entre os sensores e o volume correspondente a esses pontos eram conhecidos, foi possível calcular a vazão volumétrica na torre sob as condições indicadas no medidor a ser calibrado (equação 6).

$$Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}} \quad (6)$$

Sendo:

$Q_m$  a vazão volumétrica nas condições do medidor ( $m^3/s$ , posteriormente convertido para L/min);

$V_{2m}$  o volume acima do nível do sensor inferior corrigido para as condições do medidor ( $m^3$ );

$V_{1m}$  o volume acima do nível do sensor superior corrigido para as condições do medidor ( $m^3$ );

$t_{1 \rightarrow 2}$  o tempo do nível da água se deslocar entre os sensores (s);

Quando trata-se dos ensaios realizados com o dióxido de carbono, o  $Q_m$  foi utilizado para determinar a vazão de leitura no rotâmetro calibrado com ar pela equação 7.

$$Q_{\text{leitura rot (ref ar)}} = Q_{\text{CO}_2 \text{ operação}} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2 \text{ operação}}}{\rho_{\text{ar (ref rot)}}} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Sendo:

$Q_{\text{leitura rot (ref ar)}}$  a vazão de leitura do rotâmetro calibrado com ar nas condições padrão de calibração correspondente a vazão do gás de operação (L/min);

$Q_{\text{CO}_2 \text{ operação}}$  a vazão considerada real do dióxido de carbono nas condições do medidor a ser calibrado " $Q_m$ " (L/min);

$\rho_{\text{CO}_2 \text{ operação}}$  a densidade de dióxido de carbono nas condições do ensaio ( $Kg/m^3$ );

$\rho_{\text{ar (ref rot)}}$  a densidade de ar nas condições de calibração do rotâmetro apresentadas no medidor ( $Kg/m^3$ );

A densidade do dióxido de carbono quanto a densidade do ar foram calculados pela equação 8. Os dois fluidos, nas condições apresentadas, possui fator de compressibilidade igual a 1, sendo desprezado na equação.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (8)$$

Sendo:

$\rho$  a densidade do fluido (Kg/m<sup>3</sup>);

P a pressão do fluido (bar);

M a massa molar (Kg/mol);

R a constante universal dos gases ( R=8,314 . 10<sup>-6</sup> bar m<sup>3</sup>/(mol K));

T a temperatura do fluido ( K);

Os resultados obtidos no medidor torre serviram para construção da curva de calibração do rotâmetro e esses valores também foram corroborados com as vazões apresentadas pelo medidor bolhometro utilizado como referência.

Antes de iniciar os ensaios no medidor de referência, a bureta foi ambientada com o detergente e uma solução aquosa 75% detergente foi preparada e adicionada a uma seringa. Essa seringa e o rotâmetro foram conectados na base do bolhometro, próximos ao termômetro. A vazão foi ajustada no rotâmetro e a solução foi bombeada para a bureta, iniciando a formação da bolha. Foi determinado dois pontos na bureta e o tempo que a bolha percorreu de um ponto a outro foi cronometrado por dois operadores e o volume correspondente a esse intervalo foi calculado.

Quando o fluido de operação nos ensaios foi o ar comprimido, dividiu-se o volume pelo tempo para obter a vazão no medidor, considerada real. Esta foi corrigida para as condições de referência na calibração do rotâmetro pela equação 9.

$$Q_R = Q_{op} \frac{P_{op} T_R}{T_{op} P_R} \quad (9)$$

Sendo:

$P_{op}$  a pressão de operação no ensaio;

$P_R$  a pressão de referência para calibração do rotâmetro;

$T_{op}$  a temperatura de operação no ensaio (K);

$T_R$  a temperatura de referência para a calibração do rotâmetro (K);

$Q_{op}$  a vazão do ar obtida no bolhometro (L/min);

$Q_R$  a vazão de ar nas condições de referência para calibração do rotâmetro (L/min);

Como a equação 9 não apresenta a constante universal dos gases, pode-se usar qualquer unidade para a pressão, desde que seja consistente nos dois lados.

Na operação do medidor com o dióxido de carbono, após obter a vazão real no bolhometro pela relação de volume sobre o tempo, também considerada vazão de operação, foi determinada a vazão de leitura no rotâmetro calibrado com ar através da equação 7.

### 3 Resultados e discussão

#### 3.1 Seleção dos sensores

Os testes com o sensor de nível reed switch apresentaram os tempos registrados na Tabela 2. O tempo médio dos quinze ensaios é de 42509 milissegundos, com um desvio de 200,61 milissegundos. O tempo correspondente aos ensaios 3, 4, 7 e 9 apresentam uma

diferença insignificante.

Tabela 18- Tempo de escoamento com o sensor de nível reed switch no protótipo

Ensaio	Tempo (ms)
1	42206
2	42601
3	42521
4	42520
5	42731
6	42625
7	42520
8	42732
9	42521
10	42625
11	42415
12	42768
13	42553
14	42101
15	42205

Os testes do sensor capacitivo no medidor torre e a média do tempo cronometrado por dois operadores encontram-se na Tabela 3. Na realização dos quinze ensaios, optou-se por cronometrar o tempo com dois cronômetros junto a medição do tempo pela placa microcontroladora para reduzir os erros aleatórios, como o tempo de reação visual e de ação dos operadores. A diferença entre a grandeza indicada pelo microcontrolador e o valor médio cronometrado por operadores não foi superior a 2,43%.

Tabela 19- Desvio entre o tempo cronometrado por operadores e registrado pelo circuito eletrônico

Ensaio	Arduino (ms)	Cronômetro (ms)	Desvio (%)
1	46509	46640	0,28
2	45582	46210	1,35
3	44038	44770	1,64
4	31475	32260	2,43
5	32195	32245	0,15
6	32403	32765	1,10
7	34225	34830	1,74
8	32402	34840	1,33
9	34152	34885	2,10
10	32329	32782	1,40
11	30806	30476	1,07
12	29378	29738	1,22
13	29376	29901	1,79
14	28437	28831	1,38
15	27913	28387	1,69

Considerando os dois tipos de sensores aptos para o aperfeiçoamento do sistema de calibração, optou-se pelo sensor capacitivo. Este modelo é mais resistente por não entrar em contato com os fluidos e evitou a perfuração da parede acrílica da torre que poderia resultar na ruptura do material.

### 3.2 Validação do método de calibração do sistema e construção da curva de calibração do rotâmetro

Após o desenvolvimento do circuito eletrônico, procurou-se conhecer as limitações do sistema de calibração. Observou-se que a pressão no manômetro não poderia ser superior a 20 psi. Também percebeu-se que a ordem dos fluidos de trabalho no sistema interferia na temperatura medida dos fluidos. O uso de ar comprimido posterior aos ensaios com dióxido de carbono apresentava uma medição no termômetro diferente da temperatura real do fluido. Então, inicialmente foi realizado os ensaios com ar comprimido.

As dimensões do bolhometro necessárias para os cálculos foram mensuradas e encontram-se na Tabela 4. A altura de 144 milímetros corresponde ao intervalo entre os pontos estipulados para cronometrar o deslocamento da bolha. O cronômetro foi disparado quando a bolha alcançava a marca de 800 mL e a medição era estagnada quando a bolha alcançava a marca de 1600 mL. Nesse intervalo foi calculado um volume de 0,794 L.

Grandeza	Medidas (mm)
Diâmetro externo	89,81
Espessura da parede	3,00
Diâmetro interno	83,81
Altura	144,00

As vazões obtidas no medidor de referência bolhometro e a vazão leitura no rotâmetro estão apresentadas na Tabela 5. Os valores dispostos são a média de cinco ensaios e a pressão de operação é semelhante a pressão atmosférica obtida com o auxílio de um barômetro. A curva de calibração da Figura 9 relaciona a altura da posição do flutuador no rotâmetro com a vazão do bolhometro sob as mesmas condições de temperatura e pressão, 21°C e 760 mmHg, respectivamente.

Tabela 21- Operação com ar. Rotâmetro Vazão obtida com o medidor bolhometro (referência) e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min. Pressão barométrica de 774,05 mmHg. Volume de 0,794 L

Rotâmetro Escala (L/min)	Temperatura (°C)	Tempo referente ao volume do bolhometro (s)	Vazão bolhometro (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K) 760 mmHg	Desvio (%)
5	23,5*	13,034**	3,6551***	3,6913	35,46
10	23,5	5,352	8,9013	8,9895	11,24
15	23,5	3,178	14,9906	15,1390	0,92
20	23,5	2,348	20,2896	20,4905	2,39

\* 23,5 °C → 23,5 °C + 273,15 = 296,65 K Média de cinco ensaios

\*\* Média de cinco ensaios com dois cronômetros cada

$$*** Q_B = \frac{0,794 \text{ L}}{13,034 \text{ s}} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 3,6551 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$**** Q_R = 3,6551 \frac{\text{L}}{\text{min}} \frac{774,05 \text{ mmHg } 294,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K } 760 \text{ mmHg}} = 3,6913 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

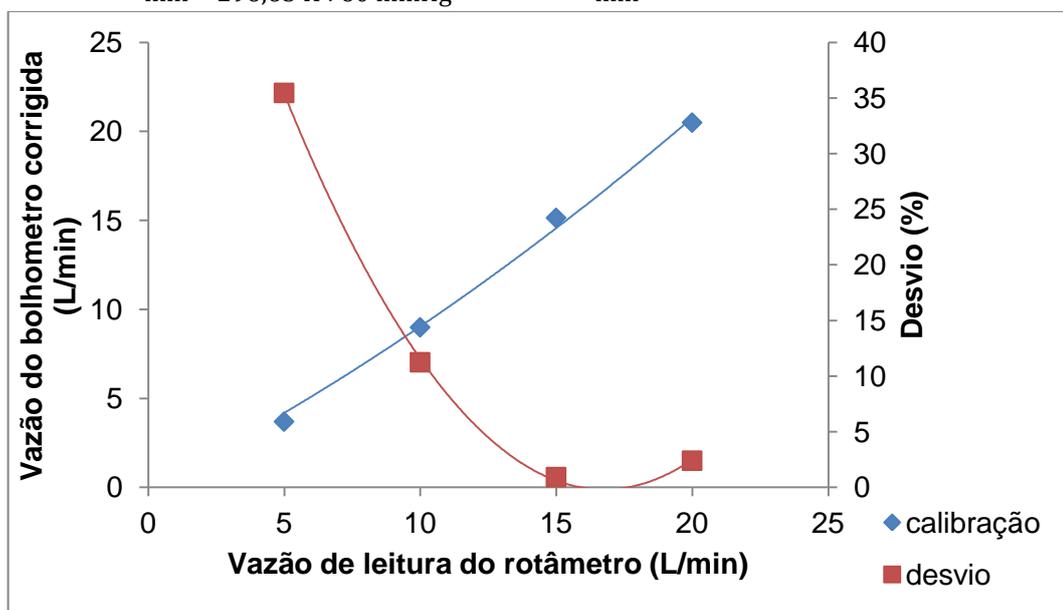


Figura 36- Curva de calibração e desvio do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min operando com ar a 21°C e 760 mmHg no bolhometro.

Já as dimensões do medidor torre, constante nos cálculos, foram mensuradas e encontram-se na Tabela 6. O volume acima do nível do sensor superior e acima do nível do sensor inferior era de 0,00099 m<sup>3</sup> e 0,003411 m<sup>3</sup>, respectivamente.

Tabela 22- Dimensões do medidor torre do sistema de calibração

Grandeza	Medidas (mm)
Diâmetro externo da torre	95,7
Espessura da parede da torre	6,0
Diâmetro interno da torre	83,7
Distância entre sensor superior e o topo da torre	180,0
Distância entre os sensores	440,0
Distância entre o nível da água e o sensor inferior	250,0

Os resultados no medidor torre da Tabela 7 foram considerados bons devido aos baixos desvios, que variavam de 2,98% a 6,68%. Confrontando esses dados com os valores de referência no bolhometro, indicaram que os rotômetros estavam calibrados. A literatura afirma que os rotômetros apresentam uma precisão medíocre que varia de 2% a 10%, dependendo da aplicação [2]. A curva de calibração na Figura 10 apresenta linearidade, indicando a validação do método de calibração com o fluido em questão.

Tabela 23- Operação com ar. Vazão obtida através da torre e vazão do rotômetro com fundo de escala 25 NL/min. Pressão barométrica de 774,05 mmHg

Rotômetro Escala (L/min)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	Vazão corrigida	Desvio (%)
					21°C (294,15K)760 mmHg	
5	23,5*	31,093**	96446,75***	100752,01****	4,6868*****	6,68
10	23,5	13,710	96446,75	100752,01	10,6291	5,92
15	23,5	9,425	96446,75	100752,01	15,4608	2,98
20	23,5	6,808	96446,75	100752,01	21,4057	6,57
25	23,5	5,483	96446,75	100752,01	26,5765	5,93

\*23,5°C → 23,5°C + 273,15 = 296,65K. Média de cinco ensaios

\*\*Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** P_1 = P_B - \rho g(J + H) = 103198,2 \text{ Pa} - 997,419 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0,25 \text{ m} + 0,44 \text{ m})$$

$$P_1 = 96446,75 \text{ Pa}$$

$$**** P_2 = P_B - \rho gJ = 103198,2 \text{ Pa} - 997,419 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,25 \text{ m} = 100752,01 \text{ Pa}$$

$$***** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100752,01 \text{ Pa} 0,003411 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K} 101325 \text{ Pa}} = 0,00336 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{V_1 P_1 T_m}{T_2 P_m} = \frac{0,00099 \text{ m}^3 96446,75 \text{ Pa} 294,15 \text{ K}}{296,65 \text{ K} 101325 \text{ Pa}} = 0,00094 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{(0,00336 \text{ m}^3) - (0,00094 \text{ m}^3) \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}}{31,093 \text{ s} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 4,6868 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

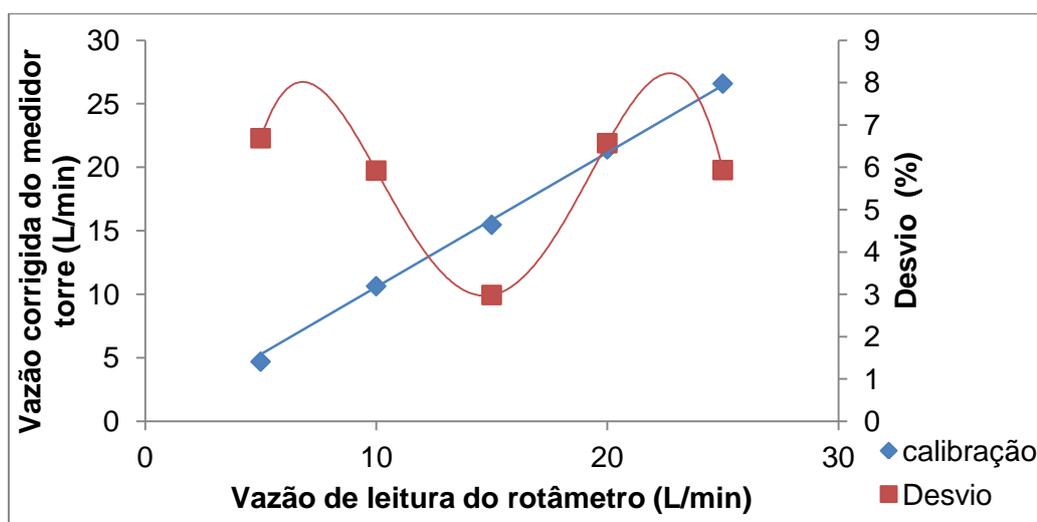


Figura 37- Curva de calibração e erro do rotômetro com fundo de escala 25 NL/min operando com ar a 21°C e 760 mmHg. Fonte: Próprio autor

Certificando-se que o método de calibração no sistema aperfeiçoado é admissível,

procurou-se realizar os estudos com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Ao alimentar o bolhometro com esse gás, foram obtidos os resultados da Tabela 8. A "vazão bolhometro" é a vazão real do CO<sub>2</sub> obtida no bolhometro a temperatura e pressão de operação, enquanto a "vazão corrigida" corresponde a vazão de leitura no rotâmetro calibrado com ar a 21°C e 760 mmHg. Os desvios entre a vazão corrigida e a vazão de leitura na escala do rotâmetro apresentaram valores adequados e a curva de calibração que relaciona a vazão de CO<sub>2</sub> no bolhometro com a posição do flutuador no rotâmetro encontra-se na Figura 11.

Tabela 24- Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através do bolhometro (referência) e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min. Pressão barométrica de 774,05 mmHg

Rotâmetro Escala (L/min)	Temperatura (°C)	Tempo referente ao volume do bolhometro (s)	Vazão bolhometro (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K) 760 mmHg	Desvio (%)
5	23,5*	12,167**	3,9155***	4,8505****	3,08
10	23,5	6,364	7,4859	9,2734	7,84
15	23,5	3,778	12,6098	15,6209	3,98
20	23,5	2,822	16,8816	20,9128	4,36

\*23,5°C → 23,5°C + 273,15 = 296,65 K. Média de cinco ensaios

\*\*Média de cinco ensaios com dois cronômetros

$$*** Q_B = \frac{V}{t} = \frac{0,794 \text{ L}}{12,167 \text{ s}} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 3,9155 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$**** Q_R = Q_{\text{operação}} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2 \text{ operação}}}{\rho_{\text{ar ref. rot.}}} \right)^{0,5}$$

$$\rho_{\text{CO}_2 \text{ operação}} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} = \frac{1,03198 \text{ bar} \cdot 44,00995 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} \cdot 296,65 \text{ K}} = 1,8414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar ref rot}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} = \frac{1,01325 \text{ bar} \cdot 28,9625 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} \cdot 294,15 \text{ K}} = 1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_R = 3,9155 \frac{\text{L}}{\text{min}} \left( \frac{1,8414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 4,8505 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

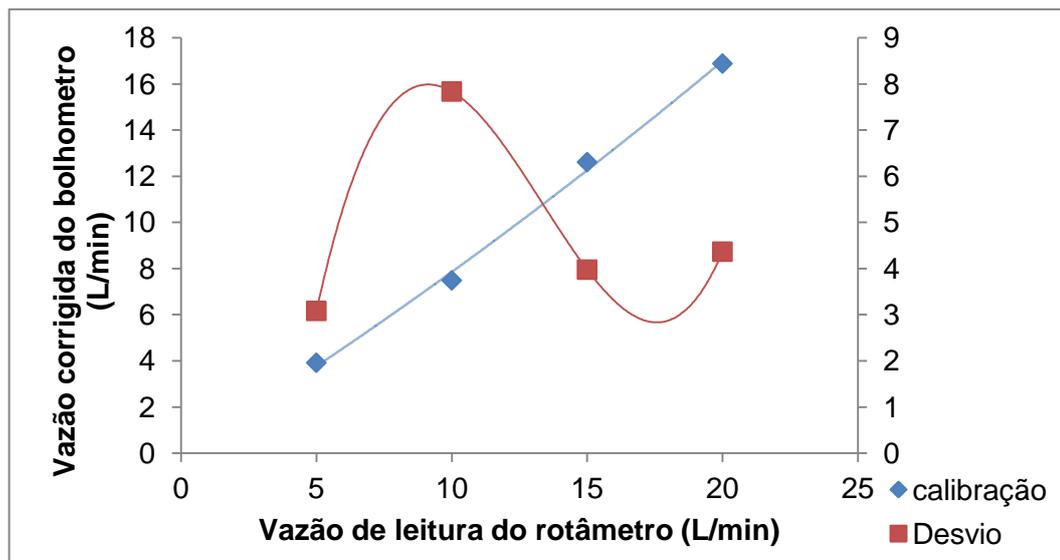


Figura 38- Curva de calibração do rotômetro com fundo de escala 25 NL/min operando com dióxido de carbono no bolhometro

Observa-se na configuração do sistema de calibração que a alimentação do dióxido de carbono ocorria pela base da torre e parte dele era retido em água por diferença de solubilidade semelhante a uma coluna de absorção. A solubilidade do gás varia proporcionalmente a pressão e inversamente proporcional a temperatura. Então, para todos os ensaios, a vazão do medidor do sistema de calibração deve ser inferior a vazão de leitura no rotômetro e a vazão real do gás desconhecida, impedindo a construção da curva de calibração.

Os dados de referência para o rotômetro referentes aos valores do medidor bolhometro podem ser comparados com os valores indicados no medidor torre (Tabela 9). Conforme os desvios, o uso desse rotômetro é indicado para uma faixa de 10 L/min a 20 L/min. Com isso, os valores do rotômetro tiveram uma proximidade.

Tabela 25 - Operação com dióxido de carbono. Vazão obtida através da torre e vazão do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min. Pressão barométrica= 774,05 mmHg

Rotâmetro Escala (L/min)	Temp. (°C)	Tempo ref. ao volume da torre (s)	Vazão torre (L/min)	Vazão corrigida 21°C (294,15K)760 mmHg	Desvio (%)
5	20,0*	50,195**	2,9378***	3,6214****	38,07
10	20,0	18,838	7,8280	9,6496	3,63
15	20,0	12,226	12,0615	14,8682	0,89
20	19,0	8,237	17,9638	18,2349	9,68

\* 20,0°C → 20,0°C + 273,15 = 293,15 K. Média de cinco ensaios.

\*\* Média de cinco ensaios com dois cronômetros e o tempo registrado pelo Arduino.

$$*** Q_m = \frac{V_{2m} - V_{1m}}{t_{1 \rightarrow 2}}$$

$$V_{2m} = \frac{P_2 V_2 T_m}{T_2 P_m} = \frac{100750,1 \text{ Pa } 0,003411 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K } 101325 \text{ Pa}} = 0,00340 \text{ m}^3$$

$$V_{1m} = \frac{P_1 V_1 T_m}{T_1 P_m} = \frac{96441,44 \text{ Pa } 0,00099 \text{ m}^3 294,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K } 101325 \text{ Pa}} = 0,00095 \text{ m}^3$$

$$Q_m = \frac{0,00340 \text{ m}^3 - 0,00095 \text{ m}^3}{50,195 \text{ s}} \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 2,9378 \frac{\text{L}}{\text{min}} \text{ de CO}_2 \text{ a } 21^\circ\text{C } 760 \text{ mmHg}$$

$$**** Q_{\text{rot (ref ar)}} = Q_{\text{CO}_2} \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{ar}}} \right)^{0,5}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{R T_{\text{CO}_2}} = \frac{1,01325 \text{ bar } 44,00995 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 294,15 \text{ K}} = 1,8234 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P_{\text{ar}} M_{\text{ar}}}{R T_{\text{ar}}} = \frac{1,01325 \text{ bar } 28,9625 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}}}{83,143 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^3}{\text{mol K}} 294,15 \text{ K}} = 1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{rot (ref ar)}} = 2,9378 \frac{\text{L}}{\text{min}} \left( \frac{1,8234 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{1,1999 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 3,6214 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

## 4 Conclusões

O presente trabalho permitiu concluir que a construção do circuito eletrônico e a programação da placa microcontroladora Arduino ocorreu de modo fácil e acessível, capaz de substituir o uso do cronômetro no sistema. A construção do protótipo para testar os sensores de nível foi de grande valia, mesmo conhecendo o rápido tempo de resposta do sensor capacitivo. Os dois tipos de sensores apresentaram bom desempenho, necessitando recorrer a outras características para a seleção. Após ensaios com dois fluidos, foi possível perceber a validação do método de calibração através do sistema aperfeiçoado, porém esse método não é indicado para todos os gases devido a solubilização deles em água. Mas a validação só foi possível pois o rotâmetro encontrava-se calibrado, como foi percebido na comparação com as vazões apresentadas no medidor de referência bolhometro.

## Referências

- [1] DUNN, W. C. **Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control**. McGraw-Hill, 2005.
- [2] DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 2ª ed. São Paulo: Blücher, 1999.
- [3] RIBEIRO, M. A. **Medição de Vazão - Fundamentos e Aplicações**. Tek Treinamento & Consultoria Ltda. 5ª ed. Salvador, 1999.
- [4] SANTOS, M. L. M. dos; ZEFERINO, R.; FRANÇA, G. A. C. **Avaliação do desempenho de um Banco de Bocais Sônicos**. 11º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e de Engenharia. Curitiba, 2006.
- [5] CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. de. **Medidor de fluxo de ar de baixo custo**. Ciências e Agrotecnologia, v. 23, n.2, p.372-376. abr/jun., 1999.
- [6] WENDLING, Marcelo. **Sensores**. São Paulo: Unesp, 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: junho, 2018.
- [7] WEG. **Automação: Sensores & Fontes**. p. 11. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-sensores-e-fontes-50029077-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: junho, 2018.
- [8] CONTROL TEC DISTRIBUIDOR AUTORIZADO SIEMENS. **Gráfico da constante dielétrica relativa**. Disponível em: <<http://www.distribuidor-oficial-siemens-productos-electricos.control-technics.com.ar/productos-electricos/es/Notas%20y%20articulos/Optoelectronica/1664/Sensores%20capacitivos.htm>>. Acesso em: junho, 2018.



ATIVO	ARQUIVO				
ID	MS-DO ENVIADO	SEÇÃO	AUTORES	TÍTULO	SITUAÇÃO
5485	05-08	ART	Pinheiro Brasil, Santos, Moraes,...	SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO DE GASES...	Aguardando designação

1 de 1 itens

## 5. REFERÊNCIAS

CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. de. **Medidor de fluxo de ar de baixo custo**. Ciências e Agrotecnologia, v. 23, n.2, p.372-376. abr/jun., 1999.

CONTROL TEC DISTRIBUIDOR AUTORIZADO SIEMENS. **Gráfico da constante dielétrica relativa**. Disponível em: <<http://www.distribuidor-oficial-siemens-productos-electricos.control-technics.com.ar/productos-electricos/es/Notas%20y%20articulos/Optoelectronica/1664/Sensores%20capacitivos.htm>>. Acesso em: junho, 2018.

CRANE Co. **Flow of Fluids**. Technical Paper nº 410, 2010.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 2ª ed. São Paulo: Blücher, 1999.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3ª ed. São Paulo: Blücher, 2014.

DUNN, W. C. **Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control**. McGraw-Hill, 2005.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. Tradução de Horácio Macedo. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1982.

GOMIDE, R. **Método permite uso amplo de rotâmetros**. Química e Derivados. maio, 1999.

HOLLAND, F. A.; BRAGG, R. **Fluid Flow for Chemical Engineers**. 2ª ed. Londres: Edward Arnold Publishers Ltd, 1995.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1ª ed. 2008.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**. 4ª ed. Barcelona: McGraw-Hill, 1991.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 2ª ed. São Paulo: Novatec, 2015.

PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999.

RIBEIRO, M. A. **Medição de Vazão - Fundamentos e Aplicações**. Tek Treinamento & Consultoria Ltda. 5ª ed. Salvador, 1999.

ROUSE, Hunter. **Highlights in the History of Hydraulics**. Books at Iowa, no.38, 1983, p. 3-17. Disponível em: <<https://doi.org/10.17077/0006-7474.1448>>. Acesso em: junho, 2018.

SANTOS, M. L. M. dos; ZEFERINO, R.; FRANÇA, G. A. C. **Avaliação do desempenho de um Banco de Bocais Sônicos**. 11º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e de Engenharia. Curitiba, 2006.

SCHNEIDER, P. S. **Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

SENAI. **Instrumentação básica II - Vazão, Temperatura e Analítica**. ES, 1999.

YODER, J. **Considering Variable-Area Flowmeter: A device with a fascinating past & potentially a bright future**. 2012, p. 26-29. Disponível em: <[www.flowcontrolnetwork.com](http://www.flowcontrolnetwork.com)>. Acesso em: junho, 2018.

WEG. **Automação: Sensores & Fontes**. p. 11. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-sensores-e-fontes-50029077-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: junho, 2018.

WENDLING, Marcelo. **Sensores**. São Paulo: Unesp, 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: junho, 2018.

## 6. APÊNDICE

### APÊNDICE A - Código do arduino

```
// COLUNA DE ÁGUA - 03/09/2017
#include <LiquidCrystal.h>      // Inclui a biblioteca do display
LiquidCrystal lcd(7,6,5,4,3,2); // Define os pinos onde o display está ligado no
arduino
const int S1 = 8;              // Define que o sensor superior está ligado no pino 8 do
arduino
const int S2 = 9;              // Define que o sensor inferior está ligado no pino 9 do
arduino
int S1_ESTADO = 0;             // Variável para armazenar o estado do sensor
superior
int S2_ESTADO = 0;             // Variável para armazenar o estado do sensor
inferior
unsigned long TEMPO;           // Variável para armazenar o tempo total da
medição
unsigned long T1;               // Variável para armazenar o tempo inicial da medição
unsigned long T2;               // Variável para armazenar o tempo final da medição
int STATUS = 0;                 // Variável STATUS para gerenciar os passos do
processo

void setup()                    // Códigos que serão executados uma única vez no
início do programa
{
  lcd.begin(16, 2);             // Define o número de colunas e linhas do LCD
  pinMode(S1, INPUT);           // Define o pino S1 como entrada
  pinMode(S2, INPUT);           // Define o pino S2 como entrada
}
void loop()                      // Códigos que serão executados continuamente no loop
do programa
{
  S1_ESTADO = digitalRead(S1);   // Faz a leitura do estado do sensor superior
(LOW ou HIGH) e transfere para a variável S1_ESTADO
  S2_ESTADO = digitalRead(S2);   // Faz a leitura do estado do sensor inferior
(LOW ou HIGH) e transfere para a variável S2_ESTADO
  switch (STATUS){               // Avalia o valor da variável STATUS para determinar
cada passo do processo

  case 0:                         // Processo em stand by
```

```

    lcd.clear();           // Limpa a tela do display
    lcd.setCursor(0, 0);  // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
superior
    lcd.print("COLUNA CARREGADA"); // Escreve no display
    lcd.setCursor(0, 1);  // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
inferior
    lcd.print(">-- STAND BY --<"); // Escreve no display
    if (S1_ESTADO == LOW) { // Se o sensor superior foi acionado inicia a
medição
        T1 = millis();     // Atribui a variável T1 o tempo em milisegundos do início
da medição
        STATUS = 1;       // Atribui o valor 1 a variável STATUS indicando que o
processo mudou para o passo 1
        lcd.clear();     // Limpa a tela do display
        lcd.setCursor(0, 0); // Posiciona o cursor do display na coluna 0 linha 0
        lcd.print("MEDINDO ..."); // Escreve no display
    }
    break;
    case 1:                // Processo em medição aguardando resposta de S2
        T2 = millis();    // Atribui a variável T2 o tempo em milisegundos do final
da medição
        TEMPO = (T2 - T1); // Faz a subtração das variáveis T2 - T1 para
encontrar o tempo decorrido da medição em milisegundos
        lcd.setCursor(0, 1); // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
inferior
        lcd.print(TEMPO); // Escreve no display o valor armazenado na variável
TEMPO em segundos
        lcd.print(" ms"); // Escreve no display

        if (S1_ESTADO == HIGH){ // Se durante o processo de medição o sensor
superior for acionado a medição é cancelada
            lcd.clear(); // Limpa a tela do display
            lcd.setCursor(0, 0); // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
superior
            lcd.print(">> CANCELADO <<"); // Escreve no display
            lcd.setCursor(0, 1); // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
inferior
            lcd.print("COLUNA CARREGADA"); // Escreve no display
            delay(5000); // Aguarda 5 segundos enquanto mostra a mensagem
de cancelamento
            STATUS = 0; // Atribui o valor 0 a variável STATUS indicando que o
processo voltou ao passo 0
        }
        if (S2_ESTADO == LOW){ // O sensor inferior foi acionado, fim da medição

```

```

    lcd.clear();           // Limpa a tela do display
    lcd.setCursor(0, 0);  // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
superior
    lcd.print("TEMPO DECORRIDO:"); // Escreve no display
    lcd.setCursor(0, 1);  // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
inferior
    lcd.print(TEMPO);     // Escreve no display o valor armazenado na variável
TEMPO em segundos
    lcd.print(" ms");     // Escreve no display
    delay(8000);         // Aguarda 8 segundos enquanto mostra o tempo
decorrido na medição
    STATUS = 2;          // Atribui o valor 2 a variável STATUS indicando que o
processo mudou para o passo 2
}
break;
case 2:                 // Depois da medição a coluna está vazia aguardando
novo enchimento
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(5, 0); // Posiciona o cursor do display na coluna 5 na linha
superior
    lcd.print("COLUNA"); // Escreve no display
    lcd.setCursor(4, 1); // Posiciona o cursor do display na coluna 4 na linha
inferior
    lcd.print("SEM AGUA"); // Escreve no display
    STATUS = 3;          // Atribui o valor 3 a variável STATUS indicando que o
processo mudou para o passo 3
break;
case 3:                 // Coluna está vazia, aguardando acionamento do sensor
inferior
    if (S2_ESTADO == HIGH){ // Sensor inferior foi acionado indicando que a
coluna está em processo de enchimento
        STATUS = 4;        // Atribui o valor 4 a variável STATUS indicando que o
processo mudou para o passo 4
        lcd.clear();       // Limpa a tela do display
        lcd.setCursor(0, 0); // Posiciona o cursor do display a esquerda na linha
superior
        lcd.print(" ENCHENDO ..."); // Escreve no display
    }
break;
case 4:                 // Coluna está em enchimento aguardando resposta do
sensor superior
    if (S1_ESTADO == HIGH){ // Sensor superior acionado
        STATUS = 0;        // Volta para o passo 0 preparado para nova medição
    }

```



## 8. ANEXO

## ANEXO A - Tabela de densidade da água de Perry, Green &amp; Maloney (1999)

t °C	ρ, kg/m <sup>3</sup>									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	999.839	999.846	999.852	999.859	999.865	999.871	999.877	999.882	999.888	999.893
1	999.898	999.903	999.908	999.913	999.917	999.921	999.925	999.929	999.933	999.936
2	999.940	999.943	999.946	999.949	999.952	999.954	999.956	999.959	999.961	999.962
3	999.964	999.966	999.967	999.968	999.969	999.970	999.971	999.971	999.971	999.972
4	999.972	999.972	999.972	999.971	999.971	999.970	999.969	999.968	999.967	999.965
5	999.964	999.962	999.960	999.958	999.956	999.954	999.951	999.949	999.946	999.943
6	999.940	999.937	999.934	999.930	999.926	999.923	999.919	999.915	999.910	999.906
7	999.901	999.897	999.892	999.887	999.882	999.877	999.871	999.866	999.860	999.854
8	999.848	999.842	999.836	999.829	999.823	999.816	999.809	999.802	999.795	999.788
9	999.781	999.773	999.765	999.758	999.750	999.742	999.734	999.725	999.717	999.708
10	999.699	999.691	999.682	999.672	999.663	999.654	999.644	999.635	999.625	999.615
11	999.605	999.595	999.584	999.574	999.563	999.553	999.542	999.531	999.520	999.509
12	999.497	999.485	999.474	999.462	999.451	999.439	999.426	999.414	999.402	999.389
13	999.377	999.364	999.351	999.338	999.325	999.312	999.299	999.285	999.272	999.258
14	999.244	999.230	999.216	999.202	999.188	999.173	999.159	999.144	999.129	999.114
15	999.099	999.084	999.069	999.054	999.038	999.022	999.007	998.991	998.975	998.958
16	998.943	998.926	998.910	998.894	998.877	998.860	998.843	998.826	998.809	998.792
17	998.775	998.757	998.740	998.722	998.704	998.686	998.668	998.650	998.632	998.614
18	998.595	998.577	998.558	998.539	998.520	998.502	998.482	998.463	998.444	998.425
19	998.405	998.385	998.366	998.346	998.325	998.305	998.285	998.265	998.245	998.224
20	998.204	998.183	998.162	998.141	998.120	998.099	998.078	998.057	998.035	998.014
21	997.992	997.971	997.949	997.927	997.905	997.883	997.860	997.838	997.816	997.793
22	997.770	997.747	997.725	997.702	997.679	997.656	997.632	997.609	997.585	997.562
23	997.538	997.515	997.491	997.467	997.443	997.419	997.394	997.370	997.345	997.321
24	997.296	997.272	997.247	997.222	997.197	997.172	997.146	997.121	997.096	997.070
25	997.045	997.019	996.993	996.967	996.941	996.915	996.889	996.863	996.836	996.810
26	996.783	996.757	996.730	996.703	996.676	996.649	996.622	996.595	996.568	996.540
27	996.513	996.485	996.458	996.430	996.402	996.374	996.346	996.318	996.290	996.262
28	996.233	996.205	996.176	996.148	996.119	996.090	996.061	996.032	996.003	995.974
29	995.945	995.915	995.886	995.856	995.827	995.797	995.767	995.737	995.707	995.677
30	995.647	995.617	995.586	995.556	995.526	995.495	995.464	995.433	995.403	995.372
31	995.341	995.310	995.278	995.247	995.216	995.184	995.153	995.121	995.090	995.058
32	995.026	994.997	994.962	994.930	994.898	994.865	994.833	994.801	994.768	994.735
33	994.703	994.670	994.637	994.604	994.571	994.538	994.505	994.472	994.438	994.405
34	994.371	994.338	994.304	994.270	994.236	994.202	994.168	994.134	994.100	994.066
35	994.032	993.997	993.963	993.928	993.893	993.859	993.824	993.789	993.754	993.719
36	993.684	993.648	993.613	993.578	993.543	993.507	993.471	993.436	993.400	993.364
37	993.328	993.292	993.256	993.220	993.184	993.148	993.111	993.075	993.038	993.002
38	992.965	992.928	992.891	992.855	992.818	992.780	992.743	992.706	992.669	992.631
39	992.594	992.557	992.519	992.481	992.444	992.406	992.368	992.330	992.292	992.254
40	992.215	992.177	992.139	992.100	992.062	992.023	991.985	991.946	991.907	992.868
41	991.830	991.791	991.751	991.712	992.673	991.634	991.594	991.555	991.515	991.476
42	991.436	991.396	991.357	991.317	991.277	991.237	991.197	991.157	991.116	991.076
43	991.036	990.995	990.955	990.914	990.873	990.833	990.792	990.751	990.710	990.669
44	990.628	990.587	990.546	990.504	990.463	990.421	990.380	990.338	990.297	990.255
45	990.213	990.171	990.129	990.087	990.045	990.003	989.961	989.919	989.876	989.834
46	989.792	989.749	989.706	989.664	989.621	989.578	989.535	989.492	989.449	989.406
47	989.363	989.320	989.276	989.233	989.190	989.146	989.103	989.059	989.015	988.971
48	988.928	988.884	988.840	988.796	988.752	988.707	988.663	988.619	988.574	988.530
49	988.485	988.441	988.396	988.352	988.307	988.262	988.217	988.172	988.127	988.082

13 - Water Density at Atmospheric Pressure and Temperature from 0 to 100°C Table of Standard Thermophysical Properties of Matter, 1978

## ANEXO B - Especificações do rotâmetro com fundo de escala 25 NL/min série RMA

<b>ESPECIFICAÇÕES</b>		
Corpo do Medidor Bezel e Tubo.	Polycarbonato	
Partes em contato com o processo.	Aço inox (exceto para válvulas em latão opcional)	
Flutuador	Aço inóx, vidro preto, Alum., K Monel, Tung. Carbide	
Limitador do Flutuador.	Polycarbonato	
Tubo para conexões.	Modelo RMA, 1/8", Modelo RMB, 1/4", Modelo RMC, 1/2" NPT.	
*O*ring	Neoprene e Buna N	
Adaptador	Aço inóx polido e suporte da base em aço inóx	
Rebites	Aço inóx	
Escalas	Alumínio escovado - revestidas em epóxi	
Botão	Plástico ABS	
Pressão máxima	RMA 100 PSI, RMB 70 PSI, RMC 35 PSI máximo	
Temperatura máxima	54,4°C máximo	
Exatidão	Modelo RMA, 4%; Modelo RMB, 3%; Modelo RMC, 2% fundo de escala.	
	<b>OPÇÕES E ACESSÓRIOS</b>	<b>CÓDIGO</b>
Material da Válvula.	Latão	BV
	Aço inox.	SSV
Válvula montada no topo.	Aço inóx - fornecida somente no modelo RMA para ar (usada em vácuo)	TMV
Bandeira de ponto.	Polycarbonato	PF

**ANEXO C - Constante universal dos gases**

Valor de R	Unidades
$83,143 \cdot 10^{-6}$	bar m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$8,20574 \cdot 10^{-2}$	L atm K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
62,364	L mmHg K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
8,314	L KPa K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
$8,314 \cdot 10^{-2}$	L bar K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>