

## FABRICAÇÃO DE CÂMARA BAROMÉTRICA PARA CALIBRAÇÃO DE BARÔMETRO

**MELO, Matheus Ribeiro**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. matheus.ribeiro1910@hotmail.com

**PIRES, Vinicius Affonso**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. vinicius@grupocompetec.com.br

**HOLANDA, João Pedro**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. joaopedrohvaz@gmail.com

**RODRIGUES, Rosemberg Fortes Nunes**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. Rosemberg.rodrigues@docente.unievangelica.edu.br

### Resumo

A pressão atmosférica medida por um barômetro é um fator de incerteza de medição a ser considerada na calibração de diversos instrumentos. Sendo necessário apresentar medições coerentes para uma correta correção e resolução dos dados colhidos. Analisando essa questão, observou-se a falta de locais especializados na calibração de barômetro e a falta de um equipamento no mercado que realize esse tipo de calibração. Então buscou-se uma solução, tendo como objetivo projetar e fabricar uma câmara barométrica na qual seja possível assegurar uma calibração com metodologias e resultados confiáveis. A fabricação da câmara barométrica foi dividida em quatro partes, sendo: projeto estrutural e desenvolvimento do sistema, controle implementado, compatibilidade do processo e ensaio de eficiência da câmara. Todo o projeto se comportou como o previsto e os resultados do ensaio da calibração de 3 barômetros teve uma porcentagem de erro de  $\pm 3,6$  hPa em relação ao barômetro padrão, sendo uma margem de erro aceitável por parte do INMETRO para que um equipamento esteja apto a efetuar calibração.

**Palavras-Chave:** calibração, bomba peristáltica, bomba de vácuo, barômetro.

### Abstract:

The atmospheric pressure measured by a barometer is a factor of measurement uncertainty to be considered when calibrating several instruments. It is necessary to present consistent measurements for correct correction and resolution of the collected data. Analyzing this issue, there was a lack of specialized locations for barometer calibration and the lack of equipment on the market that performs this type of calibration. Then a solution was sought, with the objective of designing and manufacturing a barometric chamber in which it is possible to ensure a calibration with reliable methodologies and results. The manufacture of the barometric chamber was divided into four parts: structural design and system development, implemented control, process compatibility and chamber efficiency test. The entire project behaved as expected and the results of the 3 barometer calibration test had a percent error of  $\pm 3.6$  hPa in relation to the standard barometer, with an acceptable margin of error on the part of INMETRO for a device to be able to perform calibration.

**Keywords:** calibration, peristaltic pump, vacuum pump, barometer.

## 1. Introdução

A metrologia juntamente à instrumentação vem crescendo rapidamente e ganhando grande destaque no cenário industrial, uma vez que os parâmetros e resultados dos processos representam a confiabilidade na qualidade e oferecem possibilidades de desenvolvimento tecnológico das empresas.

Existem muitos tipos de instrumentos que medem pressão em diferentes situações, que pode ser atmosférica, manométrica ou absoluta. Esses instrumentos devem fornecer dados coerentes com a realidade ou podem comprometer diversos estágios em uma indústria. Os resultados da calibração de um barômetro têm grande influência na confiabilidade da calibração de outros instrumentos, pois uma imprecisão na medição e na correção de resultados pode impactar diretamente nos processos industriais. Exemplificando-se, dentro da indústria farmacêutica existem balanças analíticas, de precisão de até 0,001 mg, onde a pressão atmosférica interfere em suas indicações. Logo, ter uma medida coerente desta pressão, impacta no resultado da calibração destas balanças. Outra grandeza que sofre o impacto da pressão atmosférica é a volumetria, sendo necessária correção nos resultados da calibração de vidrarias, tituladores e dosadores. Por fim, os balanceamentos de áreas limpas, onde necessita-se de uma diferença de pressão entre salas, exige a presença de um barômetro para indicar esta desigualdade. Para que um instrumento de medição possa fornecer um resultado preciso, é necessário que esteja devidamente calibrado [1].

A pressão atmosférica medida por um barômetro é um fator de incerteza de medição a ser considerada na calibração de diversos instrumentos. Dessa forma notou-se a necessidade do desenvolvimento desse projeto devido a observação de como uma empresa x, situada no estado de Goiás, fazia para calibrar seus barômetros, no qual esses equipamentos eram enviados para uma empresa especializada em calibração no estado de São Paulo, pois era a região mais próxima que realizava a calibração desses aparelhos. Com isso essa empresa x tinha de arcar com os custos de envio dos barômetros, calibração de cada instrumento e logística devido ao tempo gasto para ter de volta os equipamentos calibrados. E foi pensando em otimizar essas questões que se teve a ideia de projetar e construir o sistema da câmara barométrica para calibração de barômetro de forma eficiente e confiável.

A câmara barométrica surge combinando os conhecimentos e expertises na atuação das atividades de calibração associado à engenharia mecânica e suas vertentes, buscando solucionar de forma simples e ágil uma demanda aparente. Logo, o método de operação e de calibração são decorrentes da experiência prática de mercado e atividades exercidas, não sendo correlacionado a nenhum histórico de outra câmara.

O INMETRO define a calibração como uma operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medições fornecidas por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação [2].

A calibração pode ser realizada na própria empresa utilizando calibradores (quando é possível) ou em um laboratório especializado, que aplicará o processo de comparação com padrões. As mais conhecidas são a calibração acreditada ou RBC e a calibração rastreada [3].

A calibração Acreditada ou RBC como conhecida possui reconhecimento pelo INMETRO e alguns órgãos internacionais. O selo da figura 1 presente no certificado de calibração evidencia que o laboratório pertence a "Rede Brasileira de Calibração". Desta forma não é necessário evidenciar rastreabilidade de medição, eficácia do método de calibração utilizado ou competência técnica, pois o INMETRO representado pela CGCRE (Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro) auditou e audita periodicamente o Laboratório conforme a NBR ISO IEC 17025. O Certificado de Calibração emitido por laboratórios Acreditados a RBC são aceitos em quase todo o mundo [3].

Figura 1: Logomarca utilizadas por Laboratórios de Calibração Acreditados pelo INMETRO



Fonte: [3].

Todos os Laboratórios Acreditados pelo INMETRO possuem um número de Acreditação e um Escopo de Serviço Acreditado, contento as faixas de calibração e as melhores incertezas que por eles podem ser obtidas, basicamente tendo como referência à classe de Pesos-Padrões que o Laboratório possui [3].

A calibração rastreada não possui o selo de Acreditação. São calibrações que mantêm a cadeia de rastreabilidade de medição fechada até padrões calibrados por laboratórios pertencentes à RBC e têm seus métodos desenvolvidos internamente, sem a Acreditação do INMETRO. É necessário evidenciar a rastreabilidade da medição e em alguns casos o método de calibração, sendo o laboratório obrigado a disponibilizar tais evidências aos clientes [3].

Os barômetros são os instrumentos usados para medir a pressão atmosférica. Eles exigem revisões frequentes para que suas leituras sejam as mais próximas possíveis de outras contrapartes consideradas verdadeiras por meio do processo de calibração. Existem, basicamente, três tipos de barômetros: os barômetros de líquidos, os barômetros aneróides e os barômetros digitais ilustrado na figura 2 [4, 7].

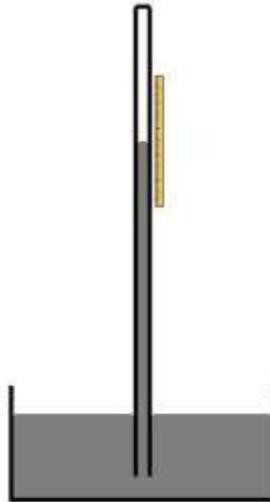
Figura 2: Barômetro digital



Fonte: [14].

A invenção do primeiro barômetro foi creditada ao italiano Evangelista Torricelli (1608 – 1647) que, em 1643, criou um barômetro simples de mercúrio. O barômetro de mercúrio de Torricelli, consistia de um tubo (fechado numa das extremidades) que continha mercúrio (ver figura 3). A altura desta coluna de mercúrio é uma medida da pressão atmosférica. Os barômetros aneróides foram inventados pelo francês Lucien Vidie (1805 – 1866) que construiu um barômetro baseado no conceito proposto pelo alemão Gottfried Leibniz (1646 – 1716) de que a deformação de uma cápsula metálica na qual se fazia o vácuo podia ser utilizada para medir a pressão atmosférica. Na atualidade, a maior parte dos barômetros é do tipo aneróide [7- 9].

Figura 3: Barômetro líquido



Fonte: [7].

O objetivo desse trabalho é fabricar uma câmara barométrica para realizar calibração de barômetro, de forma a garantir a confiabilidade dos resultados da calibração. Apresentar um equipamento que seja seguro e de interface simples. Ser financeiramente viável em relação ao processo já existente. E realizar o pedido de inspeção do INMETRO para obter o selo no certificado de calibração.

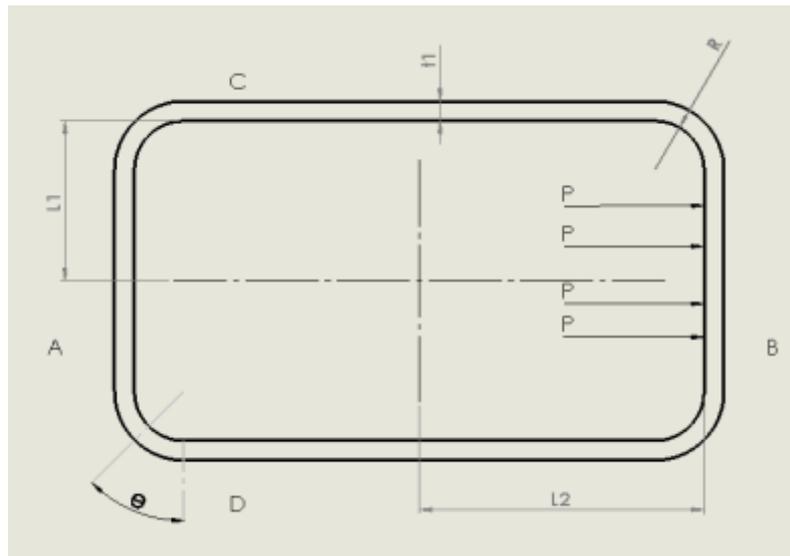
## 2. Metodologia

O trabalho concentra-se na área de desenvolvimento de projetos, com foco na elaboração de um sistema que gere e controle uma variável para a garantia de eficiência no processo de calibração. Logo, a fabricação da câmara barométrica com o devido controle automático de pressão irá garantir a confiabilidade nos resultados obtidos da calibração e trazer uma nova possibilidade de mercado, bem como a redução de custos logísticos e nas terceirizações de calibrações dos instrumentos. Adiante foi externado as etapas da construção da câmara barométrica, sendo: projeto estrutural e desenvolvimento do sistema, controle implementado, compatibilidade de processo e por fim o ensaio.

### 2.1 Projeto estrutural e desenvolvimento do Sistema

A câmara barométrica foi projetada a partir das condições e equações 1 a 14 que estabelecem a construção de vasos de pressão retangulares, pois se trata de um reservatório pressurizado em condição de vácuo ou baixa pressão (menor que 1 bar). São descritas as equações conforme a ilustração [13]:

Figura 4: Representação de vaso de pressão retangular



Fonte: Autores.

➤ Para pressão interna:

Tensões de tração:

$$Sm_C = Sm_D = \frac{P (R + L_2)}{t_1} \quad (1)$$

$$Sm_A = Sm_B = \frac{P (R + L_1)}{t_1} \quad (2)$$

$$Sm_{B-C} = \frac{P}{t_1} \left( \sqrt{L_2^2 + L_1^2} + R \right) \quad (3)$$

Tensões de Flexão:

$$Sb_C = \frac{c}{2I_1} [2M_A + P (2RL_2 - 2RL_1 - L_2^2)]. \quad (4)$$

$$Sb_D = \frac{c}{2I_1} [2M_A + P (L_2^2 + 2RL_2 - 2RL_1 - L_1^2)]. \quad (5)$$

$$Sb_A = \frac{M_A c}{I_1} \quad (6)$$

$$Sb_B = \frac{c}{2I_1} (2M_A + PL_2^2). \quad (7)$$

(8)

$$Sb_{B-C} = \frac{c}{2I_1} (2M_A + P\{2R[L_2 \cos \cos \theta - L_1 (1 - \sin \sin \theta)] + L_2^2\}).$$

$$\theta = \left(\frac{L_1}{L_2}\right). \quad (9)$$

Somatória de Tensões:

$$St_C = Sm_C + Sb_C. \quad (10)$$

$$St_D = Sm_D + Sb_D. \quad (11)$$

$$St_A = Sm_A + Sb_A. \quad (12)$$

$$St_B = Sm_B + Sb_B. \quad (13)$$

$$St_{B-C} = Sm_{B-C} + Sb_{B-C}. \quad (14)$$

Onde:

$c = \frac{t_1}{2}$  metade da espessura para pressão interna;

$I_1 = I_2 =$  momento de inércia [ $\text{mm}^4$ ];  $M_A =$  momento em 'A' [N.mm];

$Sm =$  tensão de tração;

$Sb =$  tensão de flexão;

$St =$  tensão total;

➤ Para pressão externa:

De acordo as orientações de Telles, o cálculo de espessura mínima para vasos de pressão externa (vácuo) é feito através de sucessivas aproximações, consultando tabelas e realizando substituições [10]. Dessa forma, as chapas e geometrias utilizadas, bem como as fixações e apoios, são decorrentes das análises condicionais de trabalho da câmara e da matéria-prima disponível comercialmente que se enquadra nos resultados obtidos. Optou-se por fabricar o projeto, em sua grande parte, em aço inox 304, caracterizado por sua condição anti-oxidante e de agradável acabamento.

A estrutura metálica externa é formada por tubos quadrados, chamados de metalon, que tem o objetivo de formar o esqueleto do projeto, dando suporte para a câmara de pressão e para os periféricos elétricos e eletrônicos. Sua construção foi realizada a partir da definição do volume da câmara e das dimensões dos componentes que agregam o projeto, de modo que a distribuição interna seja organizada e de fácil manutenção. A união dos tubos para a geometria final apresentada foi realizada por meio de solda TIG.

As proteções laterais e superior são constituídas de chapas finas, com espessura de 1,2 mm, a fim de proteger, somente, os componentes de controle de pressão da câmara. Tal condição não deixa ligações de fios e mangueiras expostos, gerando uma sensação de organização e padronização ainda melhor. As chapas foram dobradas e posteriormente fixadas com parafusos na estrutura de metalon, sendo possível removê-las para uma futura manutenção ou intervenção.

A câmara de pressão foi projetada para suportar pressões de -1 a 1 bar, logo, obedecendo as recomendações e equações de Pedro Telles (Vasos de Pressão, 1996), a chapa utilizada para a fabricação foi de 1/8" (3,125 mm) de espessura, com os cantos arredondados para alívio de tensões. A chapa passou por processos de calandramento para que fossem gerados os raios nos cantos e posteriormente a soldagem do perfil. O volume foi definido de acordo ao tamanho médio dos barômetros possuídos, contabilizando uma inserção de até 8 barômetros juntos na câmara. As dimensões definidas foram, Comp. 450mm x Alt. 300mm x

Larg. 300mm, totalizando um volume de, aproximadamente, 40 litros. A câmara de pressão é suportada na estrutura enrijecida de metalon.

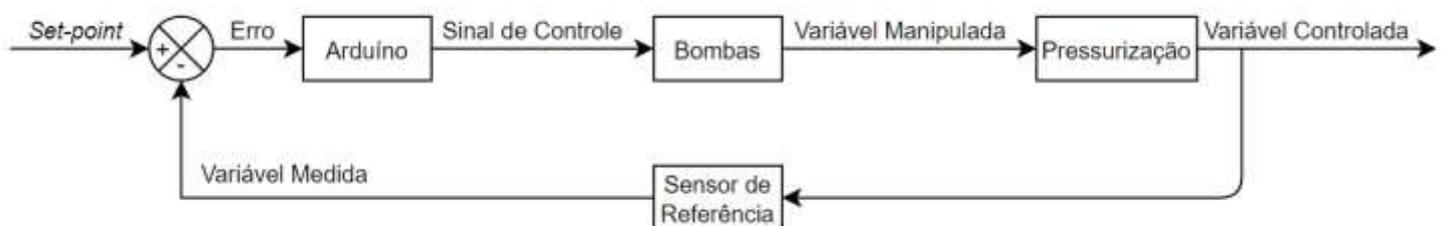
Por fim, a tampa frontal é fabricada de acrílico, por ser um material transparente e permitir a tomada de indicações dos instrumentos dentro da câmara de pressão. Existe ainda a presença de uma vedação de silicone entre a câmara e a tampa frontal.

## 2.2 Controle Implementado

O sistema de controle da câmara tem como função manter a pressão constante em seu interior em um determinado *set-point*, sendo possível comparar as indicações dos mensurandos com a de um padrão de referência, fixo na câmara. Para realizar tal função, utilizou-se de uma bomba de vácuo, uma bomba peristáltica, um transmissor de baixa pressão com resolução de 0,1 mbar e uma placa de controle Arduíno equipada com display e interface.

Como exposto anteriormente, a principal condição esperada da câmara barométrica é a manutenção da pressão constante em um determinado tempo de trabalho. Para isso, todos os itens apresentados trabalham em conjunto, garantindo o desempenho da câmara. A figura 5 representa o diagrama de blocos da malha de controle da câmara barométrica.

Figura 5: Representação de vaso de pressão retangular



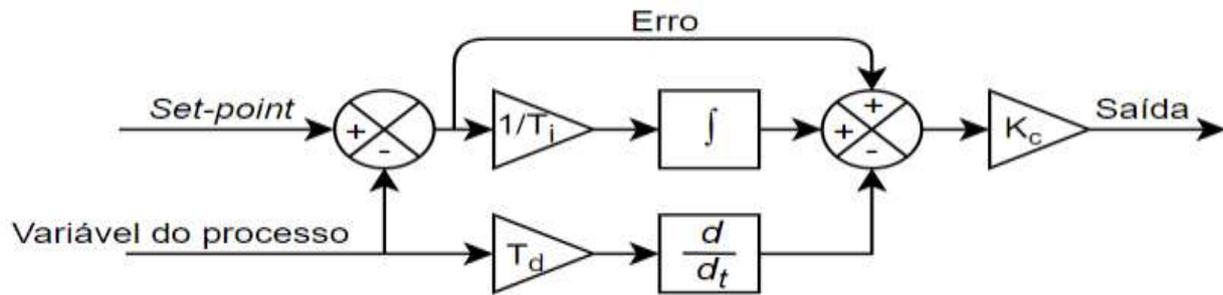
Fonte: Autores.

A placa Arduíno escolhida para o controle da câmara foi o Arduíno Uno R3, ele tem 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação uma conexão ICSP e um botão de reset. A placa faz todo o processo de controle lógico e de programação, como os acionamentos das bombas, definição de *set-point*, início e fim de ciclo, bem como o controle PID, responsável por manter a pressão em uma tendência próxima a estabelecida pelo *set-point*.

De acordo com Labdeg, “os controladores PID são controladores com feedback muito utilizados em automação industrial. Esses controladores calculam um erro entre o valor medido na saída e o valor desejado no processo. Assim o controlador tenta diminuir o erro que foi gerado pela saída, ajustando suas entradas”. A sigla significa que o controle é Proporcional, Integral e Derivativo. A banda proporcional é utilizada para minimizar a oscilação do controle de ligar/desligar, nesse caso da bomba peristáltica. A banda integral soma o erro do sistema ao longo do tempo, portanto, seu efeito é de conduzir o erro estacionário o mais próximo de zero possível. A componente derivada faz com que a saída de controle diminua seus pulsos se a variável do processo está aumentando rapidamente. Na prática, as funções que definem o controle PID no arduíno são, respectivamente: uma constante que age em função do erro do controlador, uma constante que incrementa a cada intervalo de tempo de processamento e uma constante que decrementa a cada intervalo de tempo. [15]

O diagrama da figura 6 representa, simplificada, o funcionamento do controle PID na placa de controle:

Figura 6: Diagrama do controle PID



Fonte: Autores.

A bomba de vácuo, como é chamada comercialmente, funciona como uma bomba mista, gerando pressão positiva e negativa, logo, ela é responsável por realizar a rápida pressurização no interior da câmara, ou seja, é quem gera o volume de ar de forma mais ágil para preencher os 40 litros da câmara. O modelo utilizado foi de bancada, do fabricante Nova Ética, capaz de gerar uma pressão negativa de até -0,6bar e positiva de 3 bar. A bomba peristáltica é quem faz a dosagem fina do processo, elevando ou diminuindo a pressão em baixa resolução afim de mantê-la o mais próximo ao *set-point* possível. A bomba escolhida foi a modelo EXP-8803 da fabricante Exatta, com uma capacidade de geração variável de 0,3 a 2,5 L/h. Ambas as bombas são alimentadas com tensão de 220V monofásico, o que facilita a utilização das mesmas.

O transmissor de pressão é o sensor padrão de todo o processo. Ele fornece o sinal para o controlador Arduino, que por sua vez aciona a bomba peristáltica para controle da variável estabelecida. O transmissor é também a referência padrão para a calibração dos barômetros mensurados, uma vez que o mesmo é calibrado e apresenta resultados confiáveis de medição. O sensor de pressão escolhido foi do fabricante Wika, modelo P-30, fabricado para aplicações de medições e testes em bancadas e tecnologias da calibração. Sua exatidão de 0,1% fornece a confiabilidade necessária para todo o sistema e o sinal de saída (4 a 20 mA) pode ser lido diretamente pela placa arduino.

### 2.3 Compatibilidade de Processo

Espera-se que a câmara mantenha o controle da pressão próximo ao *set-point* estabelecido, sendo possível a verificação da variação dos instrumentos em calibração ao sensor padrão de referência. Para tal, observa-se que a vedação adequada de toda a câmara, uma boa visibilidade e a agilidade de mudanças de pontos de pressão são detalhes fundamentais para a aprovação do processo de calibração.

De forma geral, pode-se definir que a câmara barométrica e o método de calibração são processos sensíveis e passíveis de grandes interferências, primeiramente por se tratar de pequenas pressões e por utilizar-se como fonte de pressão o ar, um fluido compressível. Logo, as metodologias aplicadas e o projeto estabelecido visam a redução (ou extinção) desses fatores influentes no sistema.

### 2.4 Ensaio

O método de ensaio utilizado será a calibração indireta permitida pelo Inmetro e definida, em termos técnicos, como “o mensurado é provido de um sistema auxiliar, que atua simultaneamente com o instrumento e o padrão. Ou seja, os resultados obtidos no instrumento são comparados com as indicações do padrão e a partir disto são calculados os erros e incertezas”.

Dessa forma, o procedimento operacional adotado seguirá alguns passos importantes para a melhor coleta das leituras. De forma sequencial, primeiramente, os barômetros devem ser inseridos na câmara em

uma disposição que sua indicação esteja visível e de fácil leitura (a câmara terá capacidade para inserção de até 8 barômetros do modelo portátil). Em seguida, deve-se fechar a tampa frontal de acrílico da câmara e energizar o sistema. Define-se então seis pontos de calibração e insere-se cada ponto no valor do *set-point* da câmara. Após a inserção do *set-point*, libera-se a pressurização da câmara, ao chegar ao valor desejado orienta-se que aguarde 2 minutos para estabilização e resposta dos mensurandos. Após a estabilização, toma-se as leituras indicadas pelos instrumentos e pelo valor de referência padrão da IHM e altera-se o *set-point* para o próximo ponto definido. O procedimento de alteração dos *set-points* será feito em duas etapas, chamadas de carregamento e descarregamento, o carregamento parte do menor para o maior ponto definido e descarregamento parte do maior para o menor ponto definido.

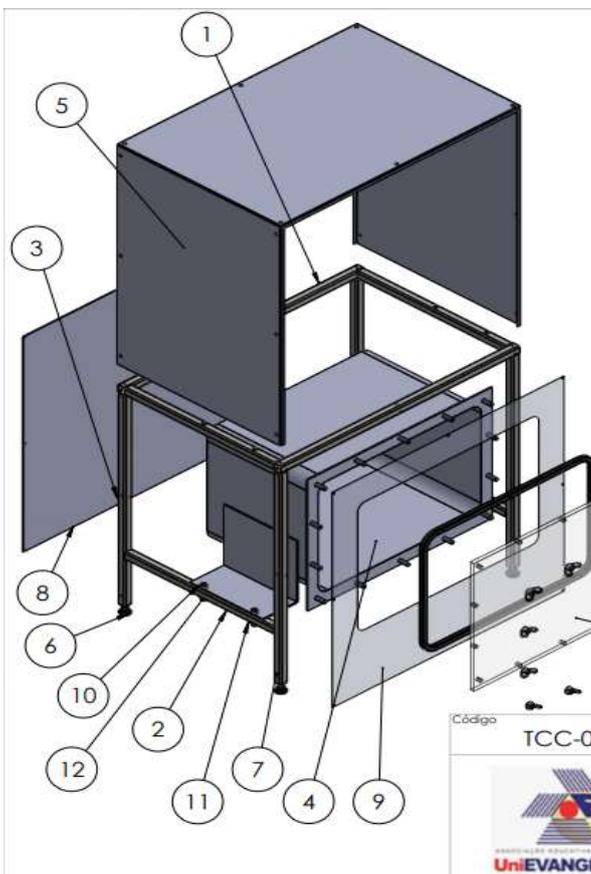
Os dados coletados são anotados em uma planilha, com as leituras indicadas pelo mensurando e pelo valor padrão de referência. A partir destes dados são calculados os erros relativos a cada ponto juntamente à sua incerteza de medição e, por fim, apresentados os resultados obtidos.

### 3. Resultados e discussão

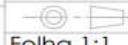
#### 3.1 Projeto estrutural e desenvolvimento do Sistema

Os materiais utilizados juntamente ao projeto desenvolvido resultaram em um sistema aconselhado para uso em bancada, mas que pode ser facilmente transportado devido a seu baixo peso, tamanho compacto e geometria de construção. A manutenção, se necessária, também será facilitada pelo uso de parafusos para o sistema de fixação, ao contrário de soldas e rebites, e também a reposição de peças. A lista de materiais na figura 7 inclui todos os elementos mecânicos presentes no projeto.

Figura 7: Lista de materiais da câmara barométrica



ITEM	NOME DA PEÇA	DESCRICAÇÃO MATERIAL	QTD.
1	Metalon 20 x 20 - 660mm	Metalon Inox 304#1,2x20x20	2
2	Metalon 20 x 20 - 410mm	Metalon Inox 304#1,2x20x20	4
3	Metalon 20 x 20 - 580mm	Metalon Inox 304#1,2x20x20	4
4	Chaparia Câmara	Chapa Inox 304#1/8"	1
5	Chapa 'U' Externa	Chapa Inox 304#1,5mm	1
6	Pé Emborrachado	Pé Emborrachado 3/8"	4
7	B18.3.5M - 3 x 0.5 x 8 Socket FCHS -- 8C	Parafuso allen inox escareado M3x8mm	32
8	Chapa Traseira	Chapa Inox 304#1,5mm	1
9	Chapa Frontal	Chapa Inox 304#1,5mm	1
10	B18.3.1M - 8 x 1.25 x 35 Hex SHCS -- 35CHX	Parafuso allen inox c/ cabeca M8x35mm	4
11	B18.2.2M - Plain washer, 8 mm, narrow	Arruela lisa inox M8	4
12	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M8 x 1.25 --D-C	Porca inox M8	4
13	Vedação Porta	Vedação retangular de silicone	1
14	Tampa de Acrílico	Acrílico #10mm	1
15	Porca c Orelha	Porca c/ orelha M8	14

Código	TCC-001	Material	Aço Inox 304	Dimensões	663x602x453	Escala:	1:10
Projeto	Câmara Barométrica	Projeto	TCC	Ciente	TCC	Unidade:	mm
Conjunto	Estrutura	Quantidade	1	Data:	06/03/20	Numero:	
Descrição	Montagem Estrutural						
							Folha 1:1

Fonte: Autores.

O projeto da câmara barométrica possui diversas vantagens estruturais quando se observa suas características de construção, são elas: resistência mecânica para suportar peso e pressão; versatilidade; agilidade na fabricação; durabilidade; padronização e um excelente custo-benefício. Uma estrutura metálica de aço inox, que não está exposta a meios corrosivos e condições abrasivas, tem condição de se manter intacta por muitos anos, sem perder suas características originais e mantendo ótima aparência visual.

### 3.2 Controle Implementado e Compatibilidade de Processo

Após todas as instalações e programações concluídas, inicializou-se os testes de funcionamento na câmara barométrica, no qual foram feitas as observações referentes às ligações elétricas/eletrônicas e comunicação sensorial. Após realizar a conferência, a câmara foi ligada na rede elétrica que funcionou perfeitamente em conformidade ao pressuposto. Foi feito a programação em seu *set-point* para 900 mbar (hPa) e, em um tempo de aproximadamente 2 minutos, a pressão definida foi atingida (este tempo pode variar em função da diferença entre a pressão atmosférica e a pressão de *set-point*).

Aguardou-se, então, um período de 10 minutos com a pressão estabilizada para verificação de algum possível vazamento na estrutura e a variação encontrada foi validada como admissível para se realizar a calibração de instrumentos. A programação no controlador arduino atua de forma que quando a pressão atinge o *set-point* estabelecido, o controle PID começa a atuar. Como a função é configurada automaticamente pela biblioteca do dispositivo, percebeu-se que o controlador liga e desliga constantemente a energização da bomba peristáltica, para manter a pressão o mais próximo ao *set-point*, não trabalhando com histerese determinada.

Por fim, após finalizar e analisar as variáveis do teste (atuação das bombas, mínima variação de pressão, agilidade na atuação, controle e vedação) conclui-se que a câmara está compatível às expectativas supracitadas e pode-se realizar os testes com os barômetros disponíveis.

### 3.3 Ensaio

As atividades de laboratório (calibração, ensaio e checagem), também designada como serviço de avaliação da conformidade (termo utilizado pelo Inmetro), vai muito além da emissão de certificados e relatórios. Como o próprio nome “conformidade” diz, o propósito de se realizar calibração e ensaio de instrumentos de medição e equipamentos deve ser no sentido de avaliar se os resultados satisfazem um requisito especificado, pois do contrário, “calibrar” por “calibrar”, com foco apenas na “emissão de documentos”, de nada serve (a não ser cumprir com os requisitos regulatórios). Logo, para a um método de calibração ser validado efetivamente, os aspectos relacionados a seus resultados devem passar pela análise mencionada acima.

O ensaio realizado com a câmara barométrica envolveu todos os elementos que permeiam este projeto e contou com três barômetros para obtenção de resultados referentes a seis *set-points* determinados. A figura 8 representa o funcionamento e disposição dos instrumentos no interior da câmara barométrica.

Figura 8: Câmara barométrica



Fonte: Autores.

Os barômetros escolhidos, doravante denominados sequencialmente de 01 a 03, tem suas características descritas na tabela 1:

Tabela 1. Dados dos Instrumentos

Dados dos Instrumentos			
Características	Barômetro 01 (hPa)	Barômetro 02 (hPa)	Barômetro 03 (hPa)
Fabricante	Altimeter	Altimeter	Oregon Scientific
Faixa de indicação	600 a 1100	600 a 1100	600 a 1100
Resolução	0,1	0,1	1
Pontos de calibração	710; 820; 880; 990; 1020; 1040	710; 820; 880; 990; 1020; 1040	710; 820; 880; 990; 1020; 1040

Fonte: autores.

Logo, tomadas as indicações dos instrumentos, a tabela 2 mostra as leituras encontradas nos três barômetros para os *set-points* determinados, em pontos ascendentes e descendentes (carregamento crescente e decrescente).

Tabela 2. Leituras – Barômetro 01, 02 e 03

Leituras - Barômetro 01, 02 e 03										
Carregamento			Descarregamento				Histerese (hPa)			
Valor Indicado no Instrumento (hPa)			Valor Indicado no Padrão (hPa)	Valor Indicado no Instrumento (hPa)			Valor Indicado no Padrão (hPa)			
Barômetro 01	Barômetro 02	Barômetro 03	sensor de referência	Barômetro 01	Barômetro 02	Barômetro 03	sensor de referência	Barômetro 01	Barômetro 02	Barômetro 03
711,8	708,1	708	709,85	711,7	708,4	708	709,85	0,10	0,30	0,00
821,0	817,4	821	819,85	821,1	817,5	821	819,85	0,10	0,10	0,00
880,7	877,2	881	879,85	880,7	877,4	881	879,85	0,00	0,20	0,00
990,0	986,6	992	989,86	990,0	986,3	992	989,86	0,00	0,30	0,00

1020,0	1016,4	1022	1019,86	1020,1	1016,5	1022	1019,86	0,10	0,10	0,00
1039,9	1036,3	1042	1039,86	1039,9	1036,3	1042	1039,86	0,00	0,00	0,00

Fonte: autores.

Após realizar-se a anotação de leituras indicadas nos instrumentos é feita a correção de resultados a partir das grandezas de influência e as incertezas envolvidas na calibração. Para isso são feitos cálculos que expressam a exatidão dos resultados baseados nas informações das médias das leituras, repetibilidade das leituras, desvios-padrões, resolução do padrão e do instrumento e tendência dos pontos de calibração na faixa de medição do instrumento. Na tabela 3 encontram-se resumidamente todos os pontos calibrados, juntamente com a média das indicações do instrumento, a média das indicações do padrão (sensor de referência), a indicação do erro instrumento, a incerteza de medição expandida e seus respectivos fatores de abrangência. É válido ressaltar que as casa decimais dos resultados apresentados são em função da resolução do instrumento.

Tabela 3. Resultados Finais – Barômetro 01, 02 e 03

Resultados Finais - 01, 02 e 03									
Indicação no Instrumento em Calibração (hPa)			Valor Médio de Referência (hPa)	Erro (hPa)			Incerteza de Medição (hPa)		Fator de Abrangência 'k'
Barômetro 01	Barômetro 02	Barômetro 03		Barômetro 01	Barômetro 02	Barômetro 03	Barômetro 01 e 02	Barômetro 03	
711,8	708,1	708	709,9	1,9	-1,6	-2	0,2	2	2,00
821,1	817,4	821	819,9	1,2	-2,5	1	0,2	2	2,00
880,7	877,2	881	879,9	0,8	-2,6	1	0,2	2	2,00
990,0	986,6	992	989,9	0,1	-3,5	2	0,2	2	2,00
1020,1	1016,4	1022	1019,9	0,2	-3,5	2	0,2	2	2,00
1039,9	1036,3	1042	1039,9	0,0	-3,6	2	0,2	2	2,00

Fonte: autores.

O documento orientativo do Inmetro (DOQ-CGCRE-014) estabelece que os instrumentos medidores digitais de pressão devem satisfazer certas exigências metrológicas destinadas a conservar os erros dentro de limites especificados. Para os barômetros digitais, a norma orienta que o erro máximo permitido deve ser  $\pm 1,0\%$  do limite superior da faixa nominal do valor do fundo da escala do instrumento [11].

Por fim, ao aplicar a orientação do documento nos instrumentos calibrados, encontrou-se um erro máximo permitido de  $\pm 11$  hPa (1,0% do valor de 1100 hPa), e observa-se que em todos os pontos calibrados para todos os barômetros ensaiados, o erro máximo encontrado foi de  $\pm 3,6$  hPa. Logo, os resultados encontrados estão em conformidade às orientações e o método de calibração pode ser considerado eficaz e aprovado para sua finalidade.

### 3.4 Viabilidade econômica (payback)

A relação custo x benefício do projeto dá-se mediante à condição de realização de uma calibração confiável em um instrumento não antes calibrado pelo laboratório. Tal fato abrange tanto as demandas internas quanto uma nova oportunidade de mercado para calibrações de barômetros de terceiros. O levantamento realizado na empresa x fornece os dados apresentados na tabela 8:

Tabela 8. Levantamento – Barômetros

Levantamento - Barômetros			
Descrição	Qntd.	Valor Unitário(R\$)	Valor Total (R\$)

Serviço de avaliação de conformidade (Calibração) em barômetro digital / analógico em até 11 pontos	11	240,00	2.640,00
Frete de envio	2	100,00	200,00
Frete de retorno	2	120,00	240,00
Valor Final (R\$)			3.080,00

Fonte: autores.

Sabe-se que a empresa x possui, hoje, 11 barômetros para utilização como padrões de referência. O custo para calibração destes barômetros em São Paulo é de R\$240,00 unitários, totalizando R\$2640,00 para toda a capacidade disponível. Existe ainda os custos relacionados à logística para envio e retorno dos instrumentos para a cidade de São Paulo. Como são instrumentos de uso diário nas atividades do laboratório, devido ao tempo de envio + calibração terceirizada + retorno (cerca de 25 dias), os barômetros precisam ser divididos em duas remessas para despacho, logo, os valores de frete apresentados na tabela consideram os dois volumes. Por fim, a periodicidade de calibração destes barômetros é de 01 ano, necessitando então serem calibrados sempre dentro desse prazo, o que sugere esse custo de R\$3.080,00 anualmente.

Para a instalação do projeto foram utilizados os materiais descritos na tabela 9, juntamente com os custos e o valor total dos materiais.

Tabela 9. Materiais Utilizados

<b>Materiais Utilizados</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Qntd.</b>	<b>Valor Unitário(R\$)</b>	<b>Valor Total (R\$)</b>
Chapas diversas, metalon, acrílico, vedação, parafusos	1	2.400,00	2.400,00
Bomba de vácuo	1	469,90	469,90
Bomba peristáltica	1	171,82	171,82
Transmissor de pressão	1	256,00	256,00
Kit Arduíno	1	109,90	109,90
Mão de Obra (hora técnica)	24	65,00	1.560,00
Valor Final (R\$)			4.967,62

Fonte: autores.

Observando os custos dos materiais juntamente aos gastos de mão-de-obra obtive-se um projeto com custo total de R\$ 4967,62.

Com a implementação do projeto para o laboratório, além de diminuir os custos da terceirização a R\$0,00, existe a possibilidade de abrir o mercado para realizar calibrações de barômetros de clientes dentro da empresa x. Um rápido levantamento indica que setores de desenvolvimento de indústrias farmacêuticas, equipamentos hospitalares e outros laboratórios de calibração possuem demanda a serem atendidos. Com isso, adotando um valor de calibração de R\$240,00 e estipulando-se calibrar 2 barômetros por mês, efetuou-se o payback descontado da tabela 10, onde utilizou-se a taxa de juros Selic de 2,25% ao ano, que dividido por 12 meses deu uma taxa de juros de 0,1875% ao mês, sendo essa a % a ser descontado em todos os meses a partir do mês 1.

Tabela 10. Payback descontado- Câmara Barométrica

Meses	Descrição	Fluxo (R\$)	Fluxo descontado (R\$)	Saldo (R\$)
0	Fabricação da câmara	-4.967,62	-4.967,62	-4.967,62
1	Calibração (02 barômetros)	480	479,10	-4.488,52
2	Calibração (02 barômetros)	480	478,21	-4.010,31
3	Calibração (02 barômetros)	480	477,31	-3.533,00
4	Calibração (02 barômetros)	480	476,42	-3.056,59
5	Calibração (02 barômetros)	480	475,53	-2.581,06
6	Calibração (02 barômetros)	480	474,64	-2.106,43
7	Calibração (02 barômetros)	480	473,75	-1.632,68
8	Calibração (02 barômetros)	480	472,86	-1.159,82
9	Calibração (02 barômetros)	480	471,98	-687,84
10	Calibração (02 barômetros)	480	471,09	-216,75
11	Calibração (02 barômetros)	480	470,21	253,46
12	Calibração de barômetros padrão	3.080,00	3.011,54	3.265,00

Fonte: autores.

Analisando as informações descritas acima, observa-se que num período 12 meses será possível pagar-se o investimento realizado para construção da câmara barométrica. Existem dois cenários a serem considerados: em primeiro momento, considerando somente as calibrações que podem ser realizadas pelo laboratório a instrumentos de clientes, após 12 meses se obtém o retorno positivo de R\$ 253,46. O segundo cenário considera que o valor da terceirização é reduzido a R\$0,00, logo, se considerado esta economia, fecha-se um retorno de R\$3.265,00.

### 3.5 Acreditação do INMETRO

A acreditação representa o reconhecimento formal da competência técnica das organizações que realizam avaliação da conformidade, é uma maneira segura de identificar aqueles que oferecem a máxima confiança em seus serviços e agrega valor. A exigência da acreditação inspira confiança no provedor ao garantir que o produto foi avaliado por um organismo independente e competente e aumenta a liberdade de escolha e fomenta um mercado livre, porém confiável.

O sistema de acreditação operado pela Cgcre (Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO) segue diretrizes que o colocam em equivalência com o de outros organismos estrangeiros congêneres (membros plenos de foros internacionais de organismos de acreditação), com os quais mantém acordos de reconhecimento mútuo. Com estes acordos, os resultados das avaliações, ensaios e calibrações realizados pelos organismos e laboratórios acreditados pela Cgcre passam a ser aceitos pelos demais organismos de acreditação, que, tal como a própria Cgcre, devem ainda promover o acordo em seus próprios países, divulgando-o às autoridades reguladoras, à indústria e aos importadores:

- Acordo de Reconhecimento Multilateral com a *International Laboratory Accreditation Cooperation* - ILAC, para acreditação de laboratórios de calibração e de ensaio desde 2000 e de laboratórios de análises clínicas desde 2012 [12];

- Acordo de Reconhecimento Multilateral com o *International Accreditation Forum* - IAF, para acreditação de organismos de certificação de sistemas de gestão da qualidade desde 1999 e para sistemas de gestão ambiental desde 2005 e como organismo de acreditação de organismos de certificação de produtos desde 2009 [12].

- Acordo de Reconhecimento Multilateral com o *Interamerican Accreditation Cooperation* - IAAC, para laboratórios de ensaios e calibração e para acreditação de organismos de certificação de sistemas de

gestão da qualidade desde 2002, organismo de acreditação de organismos de certificação de produtos e de sistema de gestão ambiental desde 2009 e para laboratórios de análises clínicas desde 2012 [12].

O VIM (vocabulário internacional de metrologia), no item 2.41, traz a definição de rastreabilidade metrológica como sendo: *“Propriedade dum resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição”*, e complementa na NOTA 7 afirmando que *“o ILAC considera que os elementos necessários para confirmar a rastreabilidade metrológica são uma cadeia de rastreabilidade ininterrupta a um padrão internacional ou a um padrão nacional, uma incerteza de medição documentada, um procedimento de medição documentado, uma competência técnica reconhecida, a rastreabilidade metrológica ao SI e intervalos entre calibrações (ver ILAC P-10:2002)”*. Assim sendo, a competência técnica reconhecida (realizada no Brasil pela Cgcre), torna-se necessária para evidenciar a rastreabilidade metrológica [12].

Com os resultados obtidos, num futuro próximo, a próxima etapa do projeto da câmara barométrica é a validação do método de calibração e da avaliação da conformidade destes resultados pela Cgcre, o que garantirá a rastreabilidade do processo e será mais um diferencial para o laboratório de calibração.

#### 4. Conclusão

De acordo com as didáticas estudadas ao longo do curso de engenharia mecânica e o conhecimento no campo de atuação, foi possível desenvolver esse projeto. A câmara barométrica foi projetada a partir dos cálculos de vaso de pressão retangular e também levando em consideração a questão de estética.

Foram realizados testes referentes a ligação elétricas/eletrônicas e comunicação sensorial, estanqueidade da estrutura, ambos supriram os requisitos necessários para conseguir manter o ambiente interno da câmara estabilizado. Logo após efetuou-se o ensaio da calibração de barômetros, no qual a % de erro foi de  $\pm 3,6$  hPa, ou seja, o resultado está em conformidade às orientações necessárias, assim mostrando que a câmara teve o método de calibração eficaz e aprovado para sua finalidade.

E em relação a viabilidade financeiro o projeto se mostrou viável tanto para calibração somente dos barômetros da empresa x, como também para a calibração de barômetros de outras empresas. Dessa forma o projeto teve seus objetivos alcançados restando apenas a submissão para avaliação do INMETRO, afim de considerar o processo de calibração reconhecido com o selo de acreditação.

#### 5. Referências Bibliográficas

- [1] FERNANDES, Josiane Maria de Macedo. **Avaliação de Fontes de Incerteza na Calibração de Instrumentos de Medir Pressão Atmosférica**. 2010. 48 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: [http://www.nupeg.ufrn.br/documentos\\_finais/monografias\\_de\\_graduacao/monografias/josianemariamacedofer nandes.pdf](http://www.nupeg.ufrn.br/documentos_finais/monografias_de_graduacao/monografias/josianemariamacedofer nandes.pdf). Acesso em: 18 abr. 2020
- [2] Inmetro. **Proposta de Termo de Referência: Definições**. 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/termoref.asp?iacao=imprimir>. Acesso em: 03 mar. 2020.
- [3] RODRIGUES, Guilherme. **Calibração Acreditada ou RBC (Rede Brasileira de Calibração) e Calibração Rastreada**. 2014. Disponível em: <http://www.ctli.com.br/index.php/a-empresa/ctli-artigos/artigos-laboratoriais/58-calibracao-acreditada-ou-rbc-rede-brasileira-de-calibracao-e-calibracao-rastreada>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- [4] HIDALGO, L. G; HIDALGO, J. A. **Método para calibrar barômetros remotos**. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Maracaibo, v. 35, n. 2, p. 200-203, agosto 2012. Disponível em: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702012000200009&lng=es&nrm=iso](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702012000200009&lng=es&nrm=iso). Acesso em 09 março 2020.
- [5] ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2017 - **Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**, 2017.

- [6] World Meteorological Organization, “**Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**”, seventh edition, 2014. Updated in 2017.
- [7] RIBEIRO, Daniel. **Barômetro**. Revista de Ciência Elementar, [s.l.], v. 2, n. 3, p.1-1, 30 out. 2014. ICETA. <http://dx.doi.org/10.24927/rce2014.220>.
- [8] J. Heilbron, ed., **The Oxford companion to the history of modern science**, Oxford New York: Oxford University Press, 2003, ISBN: 978-0-195-11229-0.
- [9] K. Hile, **The handy weather answer book**, Canton, MI: Visible Ink Press, 2009, ISBN: 978-1-578-59221-0.
- [10] TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Vasos de Pressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 1996. 302 p.
- [11] INMETRO. **Orientação para a realização de calibração de medidores digitais de pressão – DOQ-CGCRE-014**. Revisão 01, 2010. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-14\\_01.pdf](http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-14_01.pdf). Acesso em: 09 jun. 2020.
- [12] INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM**. 2012. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim\\_2012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf). Acesso em: 06 jun. 2020.
- [13] WIGGERS, Edgard. **dimensionamento de vasos de pressão com seção transversal retangular e não-reforçada**. 2014. Disponível em: [https://www.academia.edu/33550910/DIMENSIONAMENTO\\_DE\\_VASOS\\_DE\\_PRESS%C3%83O\\_COM\\_SE%C3%87%C3%83O\\_TRANSVERSAL\\_RETANGULAR\\_E\\_N%C3%83O-REFOR%C3%87ADA](https://www.academia.edu/33550910/DIMENSIONAMENTO_DE_VASOS_DE_PRESS%C3%83O_COM_SE%C3%87%C3%83O_TRANSVERSAL_RETANGULAR_E_N%C3%83O-REFOR%C3%87ADA). Acesso em: 09 jun. 2020.
- [14] **BARÔMETRO Altímetro**. 2019. Disponível em: <https://shopee.com.br/8-in1-LCD-Alt%C3%ADmetro-Digital-B%C3%BAssola-Bar%C3%B4metro-Term%C3%B4metro-Previs%C3%A3o-Do-Tempo-Calendario-de-tempo-Port%C3%A1til-ferramentas-de-caminhadas-Ao-Ar-Livre-i.191781948.6604870945>. Acesso em: 30 maio 2020.
- [15] LABDEG. **Controladores PID**. Disponível em: <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/artigo-controlador-pid-proporcional-integral-derivativo-parte-1>. Acesso em: 25 jun. 2020.